

中性子光学

清水 裕彦

高エネルギー加速器研究機構

中性子科学研究系

hirohiko.shimizu@kek.jp



宇宙とは、空間の無限の広がりに伴って時間とともに広がるものです。また、物質も時間も空間も、すべて空間の一部です。空間は無限に広がりますが、物質は有限の量しか存在しません。物質は空間の中でどのように分布しているかが、宇宙の姿を決めます。

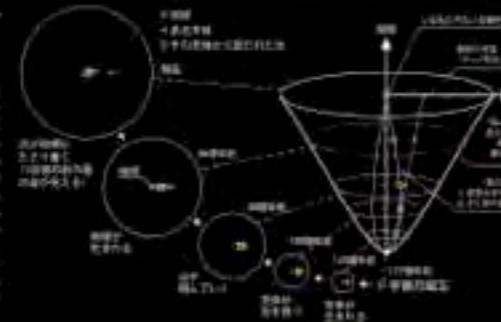
宇宙の構成要素は、物質とエネルギーです。物質は原子や分子で構成され、エネルギーは光や熱などの形で存在します。物質とエネルギーは、互いに交換可能な形で存在しています。

人間は、宇宙の中で生きています。人間は、地球という一つの惑星に生きていますが、地球は宇宙の中の一つの小さな点に過ぎません。人間は、宇宙の広大さを知り、宇宙の奥行きを感じたいと願っています。

科学は、宇宙の奥行きを探るための道具です。科学は、人間の知能と技術を駆使して、宇宙の秘密を探ります。科学は、人間の好奇心を満たすための道具です。科学は、人間の可能性を広げるための道具です。

宇宙図の見方

宇宙図は、宇宙の姿を表現するための図です。宇宙図は、宇宙の構造や進化の過程を示しています。宇宙図は、人間の想像力を刺激するための道具です。宇宙図は、人間の好奇心を満たすための道具です。



宇宙を見ることは、何をみるか?

宇宙を見ることは、何をみるか? 宇宙は、無限の広がりに伴って時間とともに広がるものです。また、物質も時間も空間も、すべて空間の一部です。空間は無限に広がりますが、物質は有限の量しか存在しません。物質は空間の中でどのように分布しているかが、宇宙の姿を決めます。

宇宙では、進歩の速度は速い

宇宙では、進歩の速度は速い。宇宙は、無限の広がりに伴って時間とともに広がるものです。また、物質も時間も空間も、すべて空間の一部です。空間は無限に広がりますが、物質は有限の量しか存在しません。物質は空間の中でどのように分布しているかが、宇宙の姿を決めます。

見えない宇宙は、見えない宇宙である

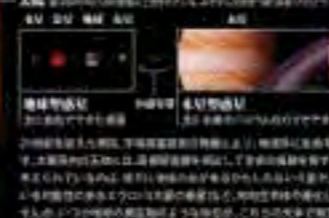
見えない宇宙は、見えない宇宙である。宇宙は、無限の広がりに伴って時間とともに広がるものです。また、物質も時間も空間も、すべて空間の一部です。空間は無限に広がりますが、物質は有限の量しか存在しません。物質は空間の中でどのように分布しているかが、宇宙の姿を決めます。

宇宙は、科学の力で見えてくる

宇宙は、科学の力で見えてくる。宇宙は、無限の広がりに伴って時間とともに広がるものです。また、物質も時間も空間も、すべて空間の一部です。空間は無限に広がりますが、物質は有限の量しか存在しません。物質は空間の中でどのように分布しているかが、宇宙の姿を決めます。

太陽系天体に生命を求めて

太陽系天体に生命を求めて。太陽系には、地球以外にも多くの天体があります。地球以外の天体には、生命が存在する可能性があります。科学者は、地球以外の天体に生命を捜すために、さまざまな手段を用いています。



もうひとつの地球を探して

もうひとつの地球を探して。地球以外の天体には、生命が存在する可能性があります。科学者は、地球以外の天体に生命を捜すために、さまざまな手段を用いています。地球以外の天体には、生命が存在する可能性があります。

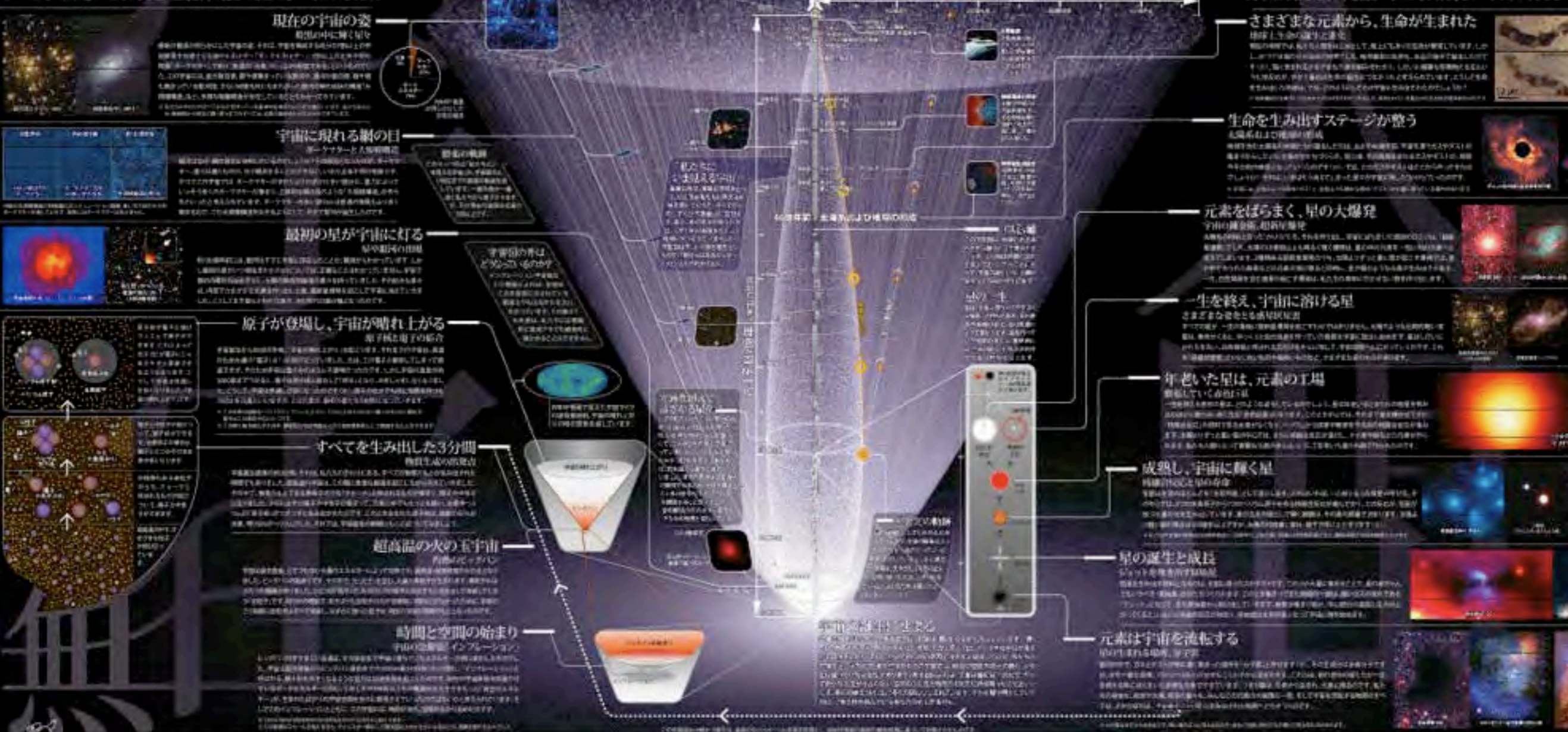


宇宙はどのように生まれたのか?

宇宙はどのように生まれたのか? 宇宙は、ビッグバンから始まりました。ビッグバンは、宇宙の始まりの瞬間です。ビッグバンは、宇宙の膨張を引き起こしました。ビッグバンは、宇宙の進化の過程を示しています。

人間の材料はどこから来たのか?

人間の材料はどこから来たのか? 人間の材料は、宇宙から来ました。人間の材料は、宇宙の膨張によって、地球に運ばれました。人間の材料は、宇宙の進化の過程を示しています。



現在の宇宙の姿

現在の宇宙の姿。現在の宇宙は、膨張し続けている。現在の宇宙は、物質とエネルギーで構成されている。現在の宇宙は、生命が存在する可能性があります。

宇宙に現れる網の目

宇宙に現れる網の目。宇宙には、網の目のような構造があります。網の目は、宇宙の膨張によって形成された。網の目は、宇宙の進化の過程を示しています。

最初の星が宇宙に灯る

最初の星が宇宙に灯る。最初の星は、宇宙の膨張によって形成された。最初の星は、宇宙の進化の過程を示しています。最初の星は、宇宙の膨張によって形成された。

原子が登場し、宇宙が晴れ上がる

原子が登場し、宇宙が晴れ上がる。原子は、宇宙の膨張によって形成された。原子は、宇宙の進化の過程を示しています。原子は、宇宙の膨張によって形成された。

すべてを生み出した3分間

すべてを生み出した3分間。3分間は、宇宙の膨張によって形成された。3分間は、宇宙の進化の過程を示しています。3分間は、宇宙の膨張によって形成された。

超高温の火の玉宇宙

超高温の火の玉宇宙。宇宙は、超高温の火の玉で始まりました。宇宙は、膨張し続けている。宇宙は、物質とエネルギーで構成されている。

時間と空間の始まり

時間と空間の始まり。時間と空間は、宇宙の膨張によって形成された。時間と空間は、宇宙の進化の過程を示しています。時間と空間は、宇宙の膨張によって形成された。

さまざまな元素から、生命が生まれた

さまざまな元素から、生命が生まれた。生命は、さまざまな元素から形成された。生命は、宇宙の膨張によって形成された。生命は、物質とエネルギーで構成されている。

生命を生み出すステージが整う

生命を生み出すステージが整う。生命を生み出すための条件が整った。生命は、宇宙の膨張によって形成された。生命は、物質とエネルギーで構成されている。

元素をばらまく、星の大爆発

元素をばらまく、星の大爆発。星の大爆発は、宇宙の膨張によって形成された。星の大爆発は、宇宙の進化の過程を示しています。星の大爆発は、宇宙の膨張によって形成された。

一生を終え、宇宙に溶ける星

一生を終え、宇宙に溶ける星。星は、一生を終えて、宇宙に溶け込む。星は、宇宙の膨張によって形成された。星は、物質とエネルギーで構成されている。

年老いた星は、元素の工場

年老いた星は、元素の工場。年老いた星は、元素を生成する工場である。星は、宇宙の膨張によって形成された。星は、物質とエネルギーで構成されている。

成熟し、宇宙に輝く星

成熟し、宇宙に輝く星。星は、成熟して、宇宙に輝く。星は、宇宙の膨張によって形成された。星は、物質とエネルギーで構成されている。

星の誕生と成長

星の誕生と成長。星は、誕生して成長する。星は、宇宙の膨張によって形成された。星は、物質とエネルギーで構成されている。

元素は宇宙を流転する

元素は宇宙を流転する。元素は、宇宙を流転する。元素は、宇宙の膨張によって形成された。元素は、物質とエネルギーで構成されている。

宇宙とは、空間の無限の広がりを持つ領域のことです。また、時間も含めて記述される、空間と時間の連続体として宇宙を捉えることもできます。宇宙は、物質とエネルギーから成り立っており、その構造や進化は、重力と膨張の力によって決まっています。

宇宙の元素

人間 科学

宇宙図の見方

宇宙図の見方
宇宙図は、宇宙の構造や進化を視覚的に表現した図です。宇宙の膨張や、星の形成、銀河の分布などを示しています。宇宙図は、宇宙の歴史を振り返るための重要なツールです。



1-1-1 宇宙を見ることは、昔を見ること
宇宙の膨張は、過去の光が私たちに届くまで時間がかかるため、遠くを見ることは過去の宇宙を見ることになる。例えば、100億光年先を見ることは、100億年前の宇宙を見ることになる。

1-1-2 見えない宇宙は無限に広がる
観測可能な宇宙は有限であるが、宇宙そのものは無限に広がっている可能性がある。観測可能な宇宙の範囲は、光速と宇宙の膨張速度によって決まる。

1-1-3 宇宙は、星の消滅は最終的
星は燃焼を続ける限り存在し続けるが、最終的には燃料が尽きて消滅する。星の消滅は、宇宙の進化の重要なプロセスである。

1-1-4 宇宙は「科学の眼」で見えない
人間の目では見えない宇宙の領域は、科学の技術によって探知されている。宇宙望遠鏡や探査機は、人間の目では見えない宇宙の奥深くまで探査している。

太陽系天体に生命を求めて

太陽系天体に生命を求めて
太陽系には、地球以外にも生命が存在する可能性がある。火星、木星の衛星イオ、土星の衛星エンセラーダスなど、生命が存在する可能性が高い天体が見つかった。

もうひとつの地球を探して

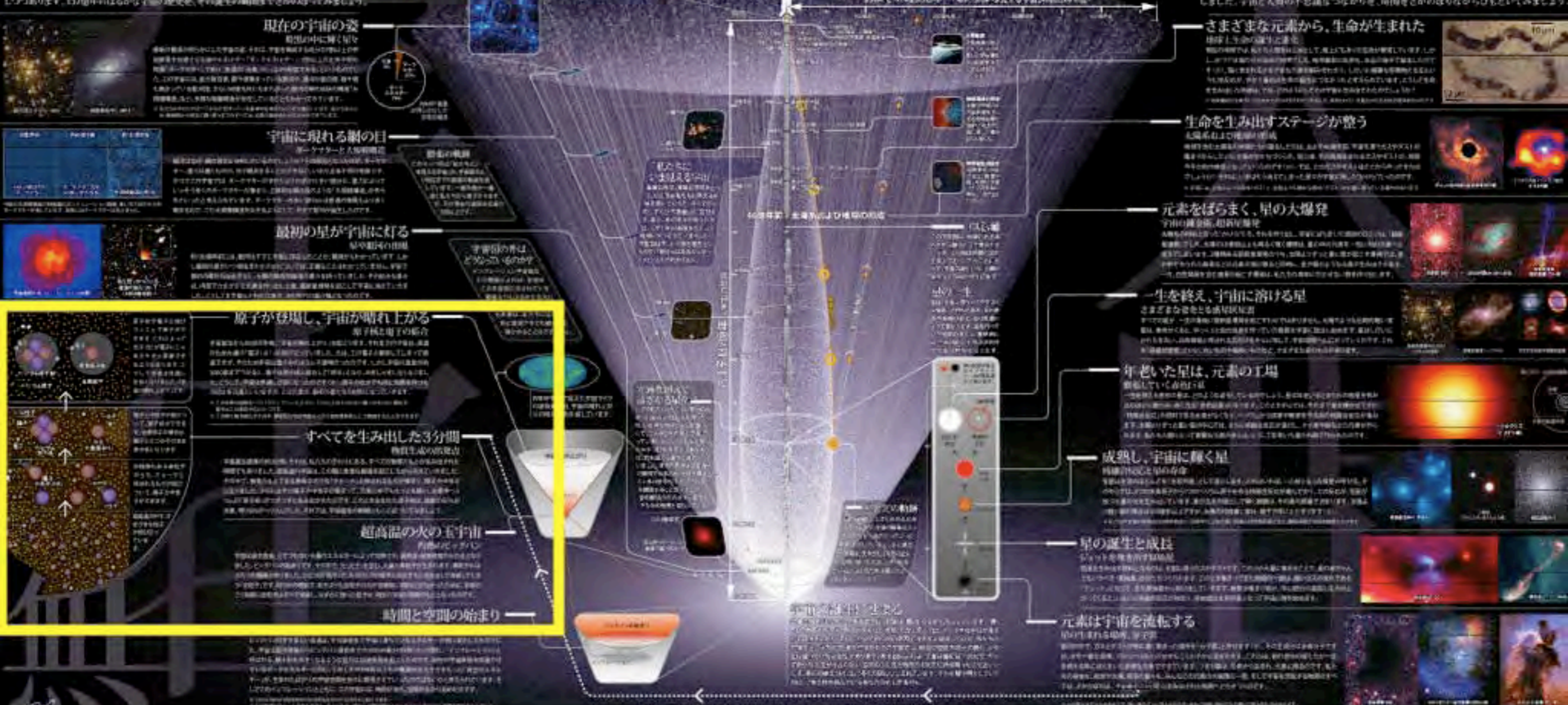
もうひとつの地球を探して
地球以外の惑星に生命が存在する可能性を探るために、宇宙探査機が送られる。火星、木星の衛星イオ、土星の衛星エンセラーダスなど、生命が存在する可能性が高い天体が見つかった。

宇宙はどのように生まれたのか?

宇宙の誕生は、ビッグバン理論によって説明されている。宇宙は約138億年前に誕生し、急速に膨張していった。宇宙の膨張は、現在も続いている。

人間の材料はどこから来たのか?

人間の材料は、宇宙から来た。星の爆発によって、宇宙に元素が散らばり、それが地球に集まって人間が生まれた。人間の体は、宇宙の塵から成り立っている。



現在の宇宙の姿

現在の宇宙の姿
現在の宇宙は、膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙に現れる網の目

宇宙に現れる網の目
宇宙には、銀河の網の目と呼ばれる構造がある。銀河は、重力によって集まり、網の目のように分布している。銀河の網の目は、宇宙の膨張によって形成された。

最初の星が宇宙に灯る

最初の星が宇宙に灯る
宇宙の誕生後、最初の星が形成された。最初の星は、重力によって集まり、燃焼を開始した。最初の星の形成は、宇宙の膨張によって促進された。

原子が登壇し、宇宙が暗れ上がる

原子が登壇し、宇宙が暗れ上がる
宇宙の膨張によって、原子が形成された。原子の形成は、宇宙の膨張によって促進された。原子の形成は、宇宙の膨張によって促進された。

すべてを生み出した3分間

すべてを生み出した3分間
宇宙の膨張によって、物質が形成された。物質の形成は、宇宙の膨張によって促進された。物質の形成は、宇宙の膨張によって促進された。

超高温の火の玉宇宙

超高温の火の玉宇宙
宇宙の誕生直後、超高温の火の玉宇宙が存在した。超高温の火の玉宇宙は、重力によって集まり、燃焼を開始した。超高温の火の玉宇宙の形成は、宇宙の膨張によって促進された。

星の消滅

星の消滅
星は燃焼を続ける限り存在し続けるが、最終的には燃料が尽きて消滅する。星の消滅は、宇宙の進化の重要なプロセスである。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

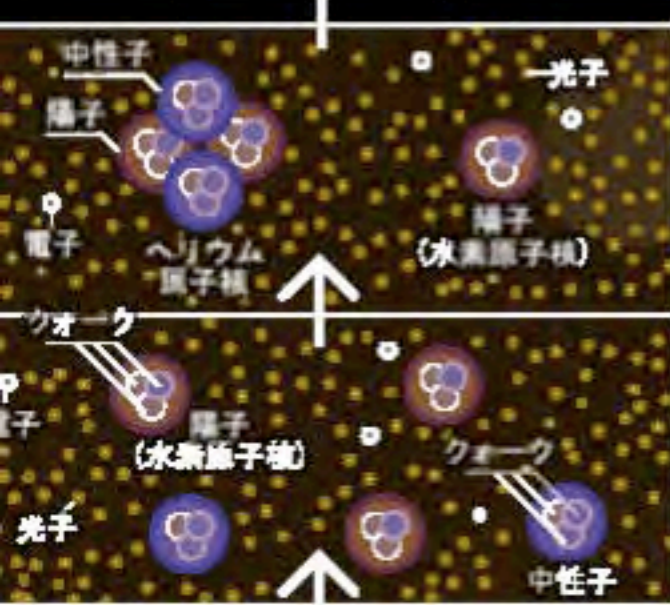
宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

宇宙の膨張

宇宙の膨張
宇宙は膨張を続けている。宇宙の膨張は、重力と膨張力のバランスによって決まる。宇宙の膨張は、現在も続いている。

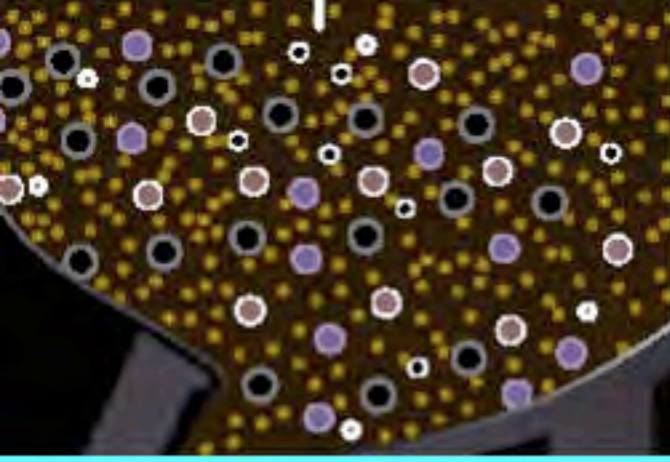


原子核が電子と結びつくことで原子ができます。これによって光子(光)が電子にじゃまされずに直進できるようになります。こうして宇宙は見通しが良くなりました。「宇宙の晴れ上がり」です。



陽子と中性子が結びついて、原子核ができます。水素原子の場合は、陽子ひとつがそのまま原子核となります。

何種類もある素粒子のうち、クォークと呼ばれるものが結びついて、陽子と中性子ができます。



超高温の中で、さまざまな粒子が飛び交っています。

原子が登場し、宇宙が晴れ上がる

原子核と電子の結合

宇宙誕生から約38万年後、「宇宙の晴れ上がり」が起こります。それまでの宇宙は、高温のため大量の「電子(※)」が飛び交っていました。光は、この電子と衝突してしまって直進できず、そのため宇宙は雲の中のように不透明だったのです。しかし宇宙の温度が約3000度まで下がると、電子は原子核と結合して「原子」となり、光をじゃましなくなりました。こうして、宇宙は見通しが良くなったのです(※)。原子のなかでも同じ性質を持つもの同士を元素といいます。この元素が、最初の星たちの材料となっていきます。

※ この世界の物質をバラバラにしていたときに、これ以上分けられない最小のものが「素粒子」。電子はこの素粒子のひとつです。
※ この時に解放された光を、現在私たちは宇宙マイクロ波背景放射として観測することができます。

すべてを生み出した3分間

物質生成の出発点

宇宙誕生直後の約3分間。それは、私たちのまわりにある、すべての物質のもとが生み出された時間でもありました。超高温の宇宙は、この間に急激な膨張を起こしながら冷えていきました。その中で、物質のもとである素粒子のうち「クォーク」と呼ばれるものが集まり、陽子や中性子となりました。さらにはその陽子や中性子が集まって、元素の中でももっとも軽い、水素やヘリウムの「原子核」が少しずつと生み出されたのです。このとき生まれた原子核は、総数の92%が水素、残り8%がヘリウムでした。それでは、宇宙誕生の瞬間にもっと近づいてみましょう。

超高温の火の玉宇宙

灼熱のビッグバン

宇宙は誕生直後、とてつもない大量のエネルギーによって加熱され、超高温・超高密度の火の玉となりました。ビッグバンの始まりです。その中で、光(光子)を含む、大量の素粒子が生まれます。素粒子にはふたつの種類がありました。ひとつが「粒子」で、もうひとつが粒子と反応すると光を出して消滅してしまう「反粒子」です。何らかの理由で、粒子よりも反粒子の方が10億個に1個ほど少なかったために、宇宙のごく初期に反粒子はすべて消滅し、わずかに残った粒子が、現在の宇宙の物質のもととなったのです。

時間と空間の始まり

宇宙の急膨張「インフレーション」

ビッグバンのすさまじい高温は、その直前まで宇宙に満ちていたエネルギーが熱に変化したものでした。宇宙は誕生直後からビッグバン直前までの10の34乗分の1秒(※)の間に、「インフレーション」と呼ばれる、数十桁も大きくなるような猛烈な加速膨張を起こしたのです。現在の宇宙膨張を加速

宇宙論は、宇宙の構造や進化を研究する天文学の一分野です。大規模な宇宙観測が行われ、宇宙の膨張や物質の分布などが明らかになっています。

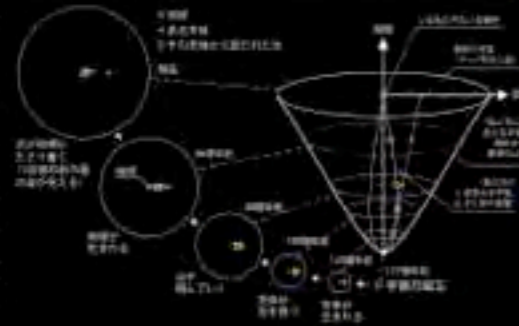
宇宙の構成要素

人間と科学

科学とはなんだろうか？

宇宙図の見方

この宇宙図は、銀河の分布や宇宙の膨張を示しています。中心は地球ですが、実際の距離は光年単位のスケールで示されています。



- (1-1) 宇宙を見ることは、昔を見ること**
宇宙の膨張速度は速く、遠くほど速く膨張している。そのため、遠くの宇宙を見ることは、過去の宇宙を見ることになる。
- (1-2) 宇宙では、星の消滅は激進**
星は燃焼燃料を使い果たすと消滅し、その残骸は超新星爆発やブラックホールとなる。
- (1-3) 宇宙は「静かなる場所」で見えない**
宇宙の膨張速度が速く、遠くほど速く膨張している。そのため、遠くの宇宙を見ることは、過去の宇宙を見ることになる。

太陽系天体に生命を求めて

太陽系天体には生命が存在する可能性がある。火星や木星の衛星には水の痕跡が確認されている。また、惑星外生命探査機が火星に到着し、生命の痕跡を探している。



もうひとつの地球を探して

地球以外の天体にも生命が存在する可能性がある。火星や木星の衛星には水の痕跡が確認されている。また、惑星外生命探査機が火星に到着し、生命の痕跡を探している。

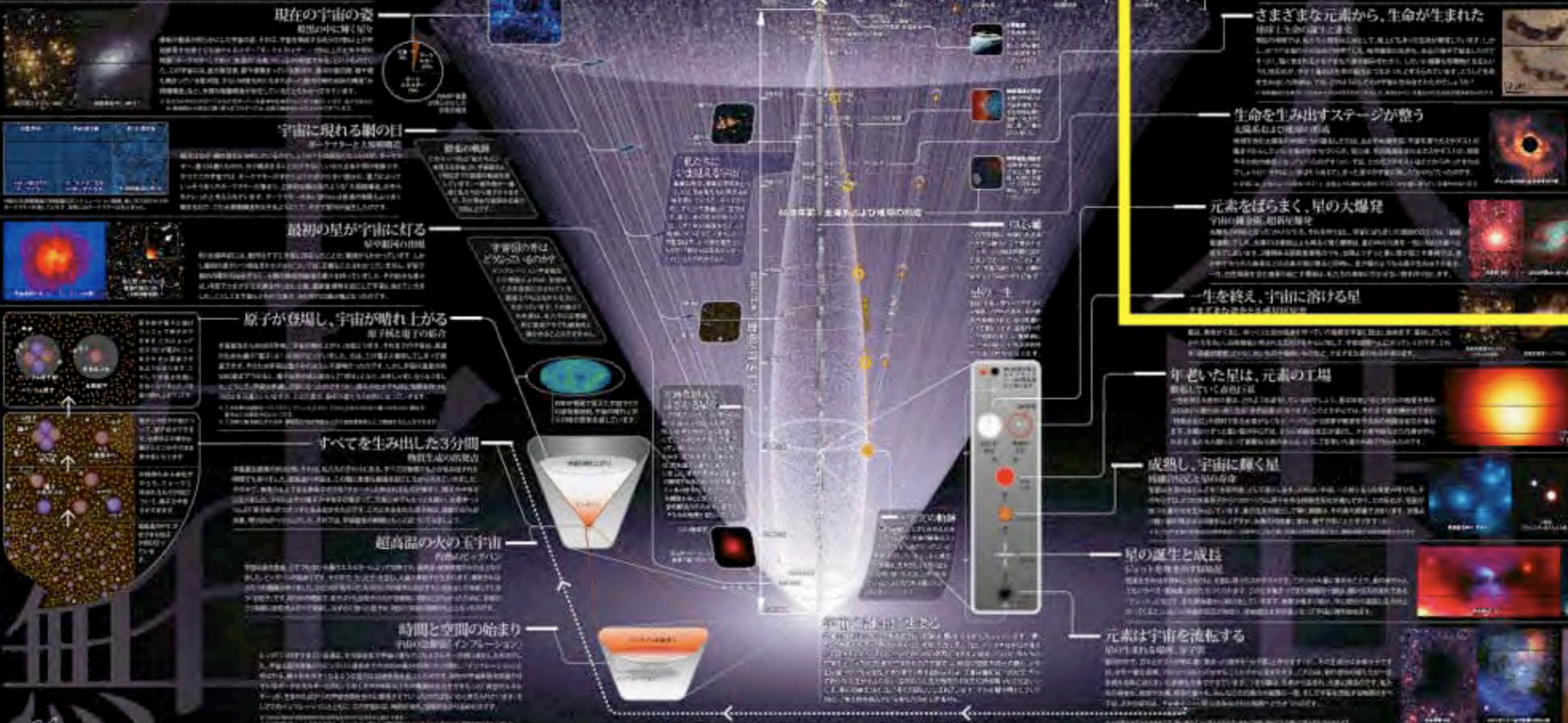


宇宙はどのように生まれたのか？

宇宙の中には何がある？

人間の材料はどこから来たのか？

私たちが暮らすこの宇宙は、かつては暗黒の世界に包まれていた。ビッグバンで始まった宇宙の進化は、現在の宇宙へとつながっている。



現在の宇宙の姿

現在の宇宙は、膨張し続けている。銀河系は中心に銀河核を持ち、周囲に星雲や星が散らばっている。

宇宙に現れる網の目

宇宙には、銀河系が網の目のように並んでいる。これは宇宙の膨張による効果である。

最初の星が宇宙に灯る

最初の星の誕生は、宇宙の歴史の中で重要なイベントである。

原子が登場し、宇宙が暗れ上がる

最初の星の放射線が原子を電離させ、宇宙を再電離させる。

すべてを生み出した3分間

宇宙の膨張と冷却により、元素の合成が行われる。

超高温の火の宇宙

宇宙の温度が高すぎるため、原子の形成が妨げられる。

時間と空間の始まり

プランクスケールでの宇宙の誕生。

さまざまな元素から、生命が生まれた

生命の誕生には、さまざまな元素が必要である。

生命を生み出すステージが整う

生命の誕生には、適切な環境が必要である。

元素をばらまく、星の大爆発

超新星爆発により、元素が宇宙にばらまかれる。

一生を終え、宇宙に溶ける星

星の一生は、宇宙の進化に貢献している。

年老いた星は、元素の工場

年老いた星は、元素の合成の工場である。

成熟し、宇宙に輝く星

星の進化は、宇宙の歴史を刻みつけている。

星の誕生と成長

星の誕生は、宇宙の進化の始まりである。

元素は宇宙を流転する

元素は宇宙を循環し、新たな生命の誕生を促している。

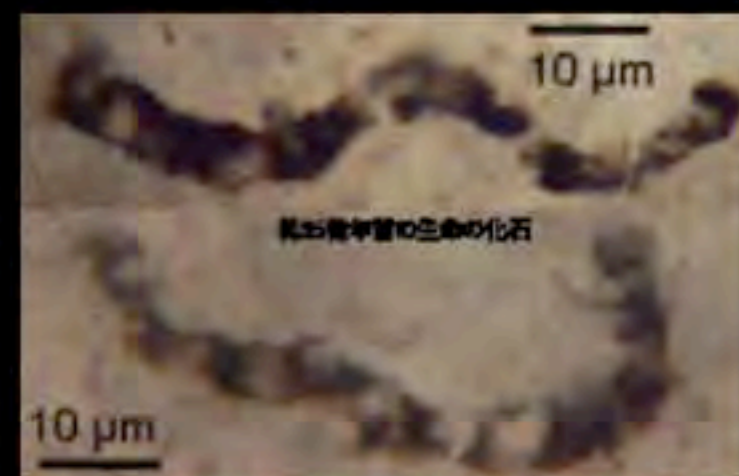
私たち人間をかたちつくる身体。それは「小さな宇宙」ともたとえられ、元素という材料から成り立っています。現代の科学は、この元素が、宇宙に輝く星々の中で生まれ、まき散らされたものであることを明らかにしました。宇宙と人間の不思議なつながりを、時間をさかのぼりながらひもといってみましょう。

さまざまな元素から、生命が生まれた

地球上生命の誕生と進化

現在の地球では、私たち人間をはじめとして、陸上にも多くの生命が繁栄しています。しかし、かつては海だけが生命の世界でした。地球最初の生命も、太古の海中で誕生したのです(※)。海に含まれるさまざまな元素が組み合わさり、しだいに複雑な有機物となるという化学反応が、やがて最初の生命の誕生につながったと考えられています。こうして生命を生み出した地球は、では、どのようにしてこの宇宙に生み出されたのでしょうか？

※ 地球最初の生命がいつ生まれたのかはまだわかりませんが、発見されている最古の化石は約35億年前のものです。

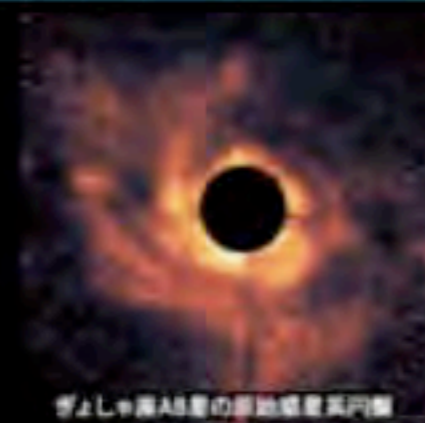


生命を生み出すステージが整う

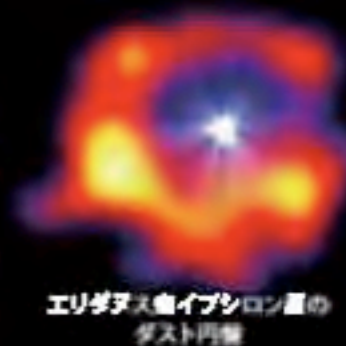
太陽系および地球の形成

地球を含む太陽系の仲間たちが誕生したのは、およそ46億年前。宇宙を漂うガスやダストの集まりからしだいに太陽がかたちづくられ、同じ頃、その周囲をまわるガスやダストが、地球やその他の惑星となっていったのです(※)。では、このガスやダストはどこからやってきたのでしょうか？ それは、いまはもう消えてしまった星々が宇宙に残した「かけら」だったのです。

※ 宇宙には、空気のような気体(ガス)と、砂粒よりも細かな固体(ダスト)が大量に漂っている場所があります。



ぎょしゃ座AB星の原始惑星円盤



エリダニス座イプシロン星のダスト円盤

元素をばらまく、星の大爆発

宇宙の錬金術、超新星爆発

太陽系の材料となった「かけら」たち。それを作り出し、宇宙にばらまいた原因のひとつは、「超新星爆発」でした。太陽の10億倍以上も明るく輝く爆発は、星の中の元素を一気に別の元素へと変えてしまいます。2種類ある超新星爆発のうち、太陽よりずっと重い星が起こす爆発では、星の中で作られた酸素などの元素が飛び散ると同時に、金や銀のような元素が生み出されます。一方、白色矮星を含む連星が起こす爆発は、私たちの身体に欠かせない鉄を作り出します。



仙后座1987A



超新星残骸M1(かに星雲)



超新星残骸(蟹状星雲)の一部

一生を終え、宇宙に溶ける星

さまざまな姿をとる惑星状星雲

すべての星が、一生の最後に超新星爆発を起こすわけではありません。太陽のような比較的軽い恒星は、寿命がくると、ゆっくりと自分自身を作っていた物質を宇宙に放出し始めます。星はしだいに



中性子光学基礎



1-1. 中性子光学基礎

(1) 中性子とは

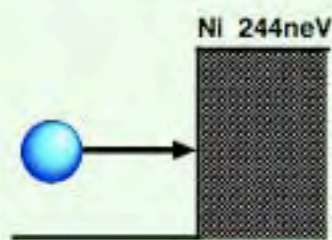
中性子は電荷を持っていません。

物質中で支配的な電磁相互作用が抑制されるため、エネルギーが低くても電磁場ではじき飛ばされることもほとんど無く、物質透過力が強く直進します。

中性子は水素原子とほぼ同じ質量を持っています。

中性子に働く相互作用は、以下の4種類です。

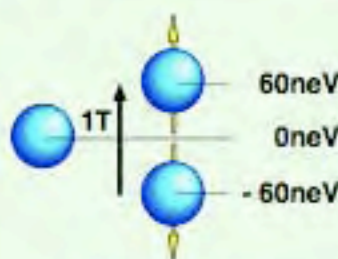
強い相互作用



Strong Interaction

中性子は物質中の原子核と強い相互作用を通じて相互作用します。強い相互作用は最も強力な相互作用ですが、原子核のごく近傍でしか働かないため、原子体積で平均すると他の相互作用と同程度になっています。

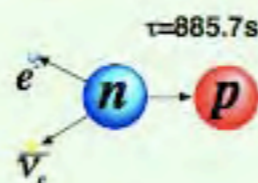
電磁相互作用



Electromagnetic interaction

中性子は電荷を持っていないので、電気的な相互作用をしません。磁気双極子能率を持っているので磁場と相互作用します。物質の性質を支配している電気相互作用の影響を受けないため、極めて物質透過力に優れます。

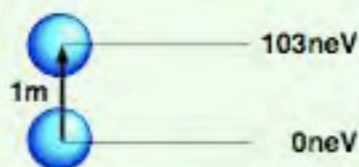
弱い相互作用



Weak Interaction

中性子は陽子とともに原子核を構成しており、原子核内では安定に存在しますが、原子核外では弱い相互作用を通じて平均寿命15分で陽子、電子、反電子型ニュートリノに崩壊します。

重力相互作用



Gravitational Interaction

重力相互作用は大変に弱い相互作用であり、通常はそれ以外の相互作用の影響に隠されてしまいます。しかし、速度の遅い中性子では地球からの重力の影響が顕著であり、落下しながら飛行する様子が観測されます。

neutron

中性子

J.Chadwickにより発見
(1932)



$$I(J^P) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2}^+ \right)$$

静止質量 (ref. PDG2004)
 $m = 939.56536 \pm 0.00008 \text{ MeV}$

平均寿命
 $\tau = 885.7 \pm 0.8 \text{ s}$

磁気双極子能率
 $\mu = -1.9130427 \pm 0.0000005 \mu_N$

電気双極子能率
 $d < 0.63 \times 10^{-25} \text{ e cm (CL=90\%)}$

自乗平均電荷半径
 $\langle r_n^2 \rangle = -0.1161 \pm 0.0022 \text{ fm}^2 \text{ (S=1.3)}$

電気分極率
 $\alpha = (11.6 \pm 1.5) \times 10^{-4} \text{ fm}^3$

磁気分極率
 $\beta = (3.7 \pm 2.0) \times 10^{-4} \text{ fm}^3$

電荷
 $q = (-0.4 \pm 1.1) \times 10^{-21} \text{ e}$

平均中性子反中性子振動時定数
 $\tau_{nm}[\text{free}] > 8.6 \times 10^7 \text{ s (CL=90\%)}$
 $\tau_{nm}[\text{bound}] > 1.3 \times 10^8 \text{ s (CL=90\%)}$

崩壊様式
 $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e \quad 100\%$
 $\lambda = g_A/g_V = -1.2695 \pm 0.0029 \text{ (S=2.0)}$
 $A = -0.1173 \pm 0.0013 \text{ (S=2.3)}$
 $B = 0.983 \pm 0.004$
 $a = -0.103 \pm 0.004$
 $\phi_{AV} = (180.08 \pm 0.10)^\circ$

$D = (-0.6 \pm 1.0) \times 10^{-3}$
 $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e \gamma < 6.9 \times 10^{-3}$
 $n \rightarrow p \nu_e \bar{\nu}_e$

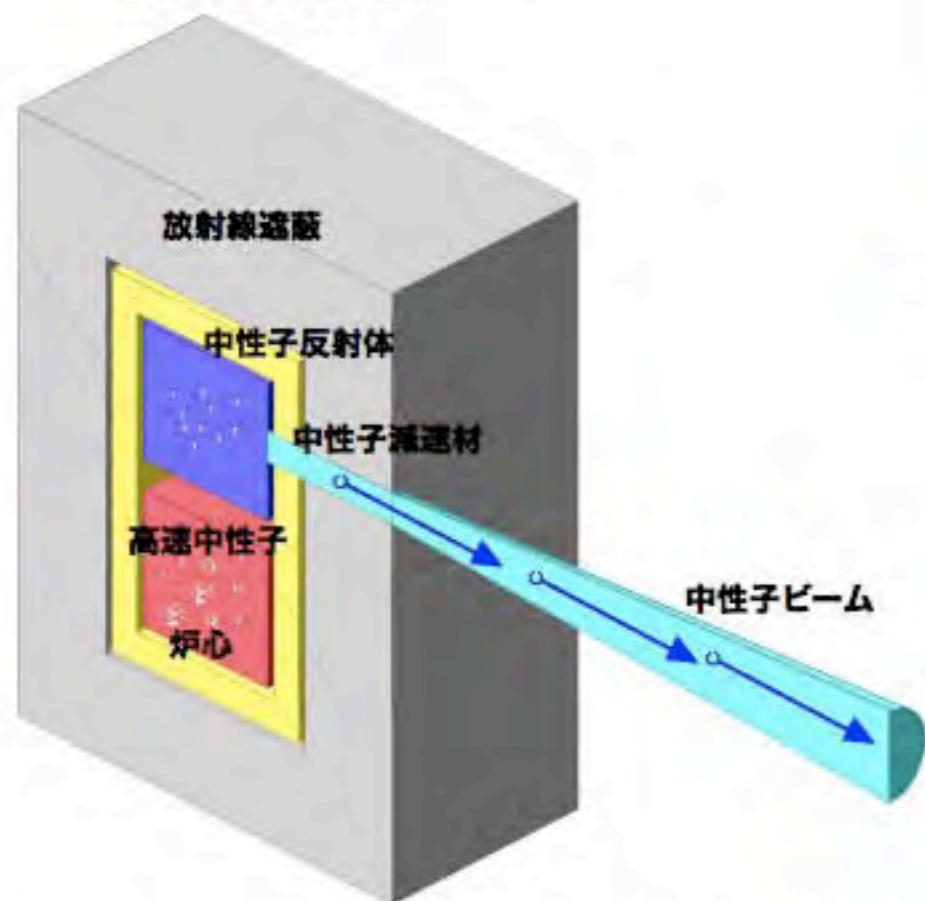


1-1. 中性子光学基礎

(2) 中性子の発生方法

中性子は原子炉や加速器などを利用して、原子核反応によって生成されます。原子核反応で発生した高速中性子を、減速材の中で散乱を繰り返すことによって低エネルギー中性子を得ます。低エネルギー中性子をビームとして遮蔽体外に導き、中性子ビームとして利用します。

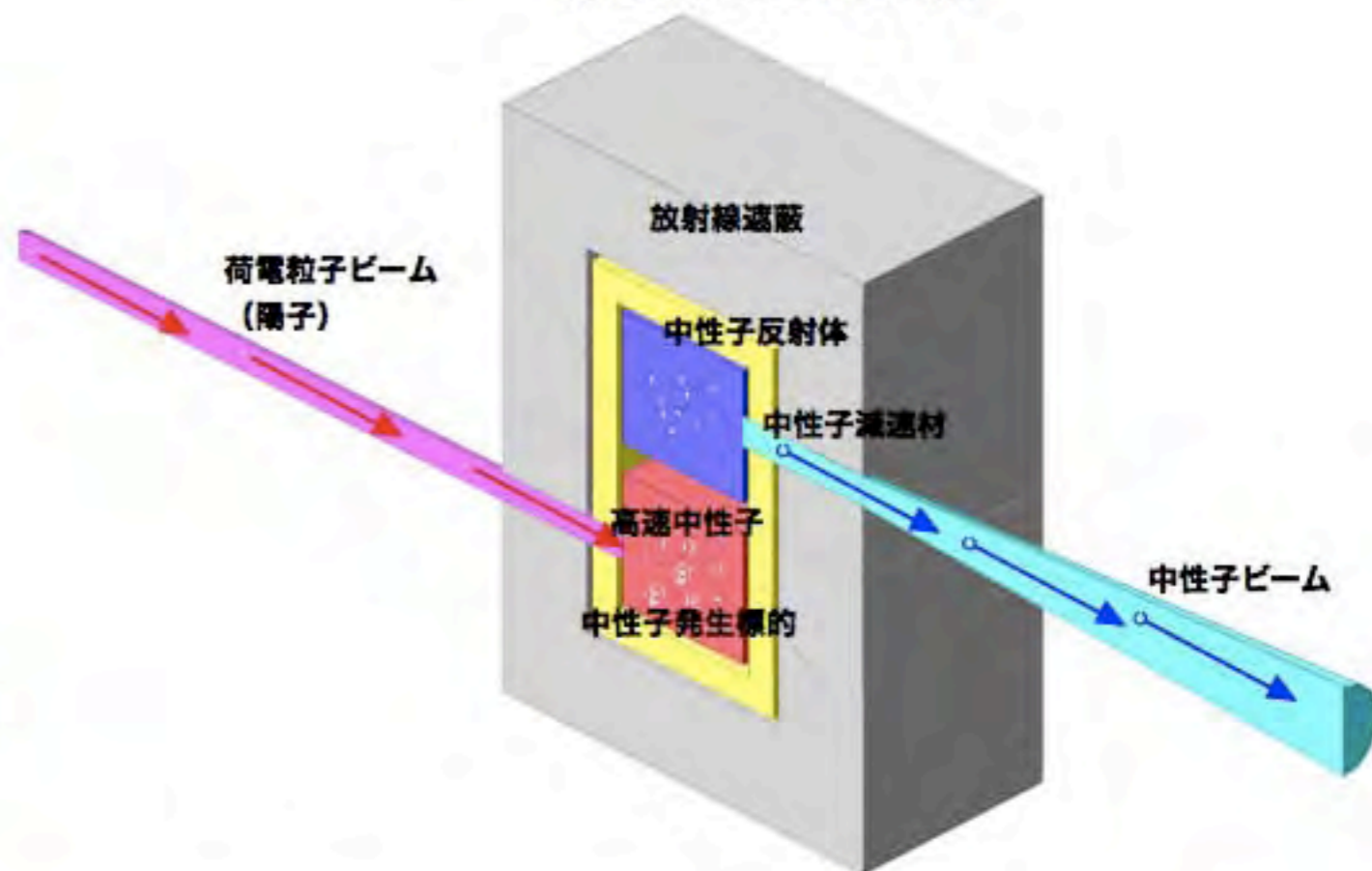
原子炉中性子源



JRR-3: 日本原子力研究所3号炉 (出力20MW)
[茨城県東海村]

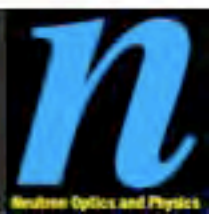
KUR: 京都大学原子炉実験所 (出力5MW)
[大阪府熊取町]

加速器駆動型中性子源



日本国内で共同利用が定期的に行われている研究用中性子源

KENS: 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所
スパレーション中性子源 (陽子ビームパワー5kW)
[茨城県つくば市]



1-1. 中性子光学基礎

(3) 中性子波

中性子は、その運動エネルギーに従って概ね次のように区分されます。

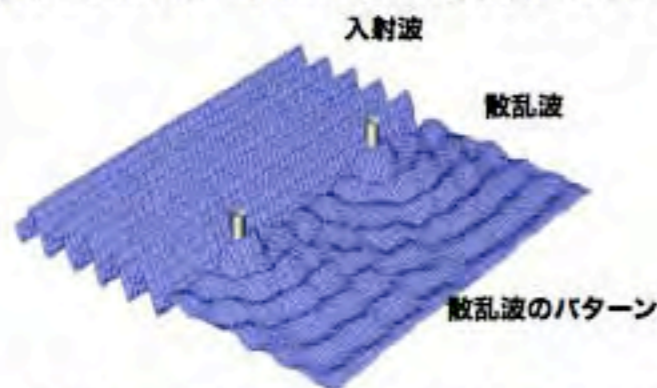


運動エネルギーが小さい粒子は、量子力学的な波の性質が顕著になります。

量子力学的波動の波長 (λ : ド・ブロイ波長) は、 $\lambda = \frac{h}{p} \sim 0.286 E^{-1/2} [\text{Å eV}^{1/2}]$ で与えられます。

中性子の波長は、熱中性子領域で、物質中の原子の間隔程度になります。

中性子の波動性は、中性子散乱実験によって、物質研究に利用されています。



一般に、研究対象物にある定まった波を入射させた時に散乱波が作るパターンから、対象物がどのような大きさでどのような配置をしているかを逆算できます。波の波長と対象物の大きさが近いほど、正確に逆算できます。

中性子の散乱パターンから、物質中の原子の配列等を観測することができます。

その他、中性子透過像撮影、中性子即発ガンマ線分析、中性子捕獲治療等に利用されています。

類似のことは、エックス線、電子線等の放射線でも可能ですが、特に中性子が期待されるのは、中性子の持つ特性が本質的に関わっています。

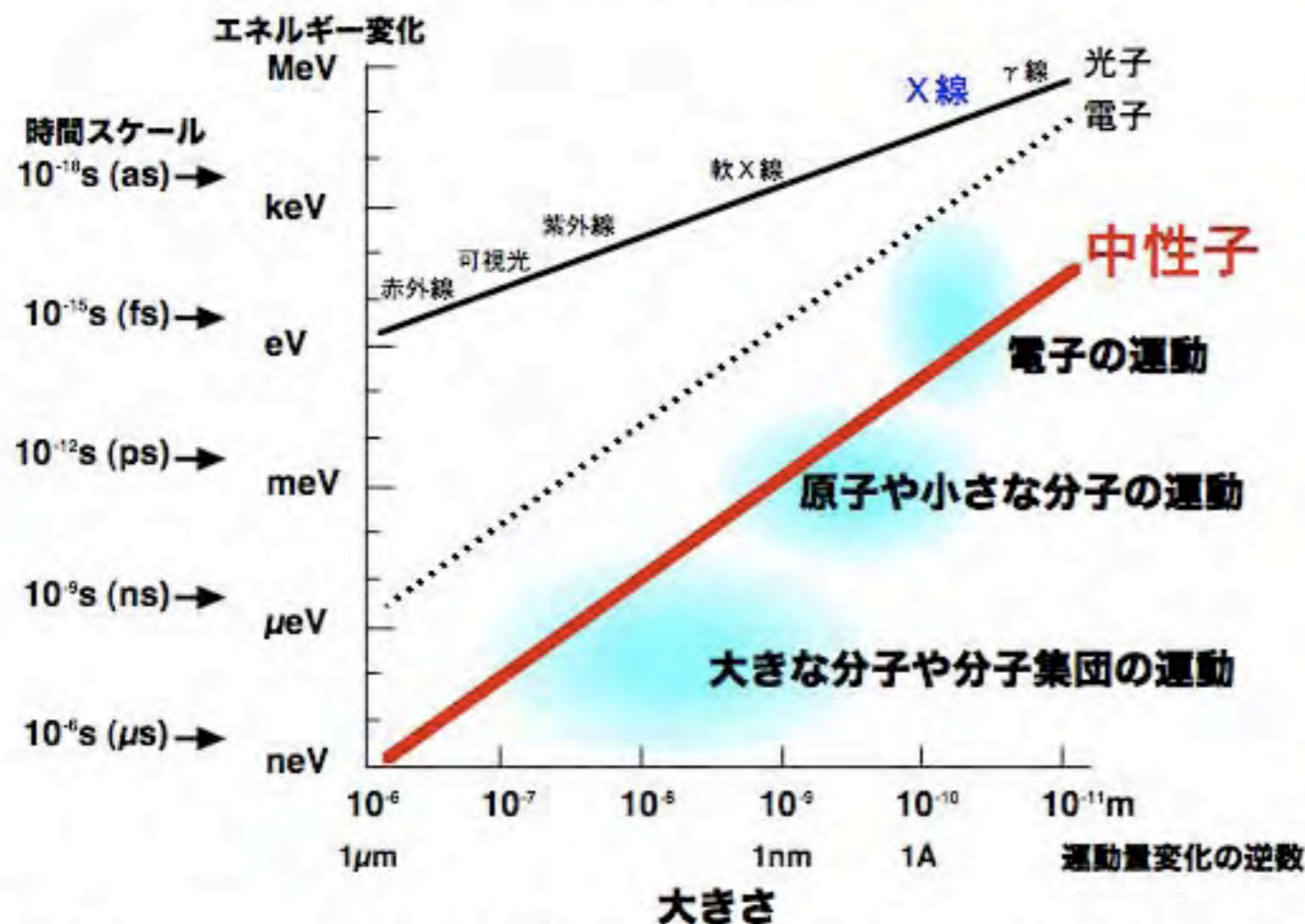


1-1. 中性子光学基礎

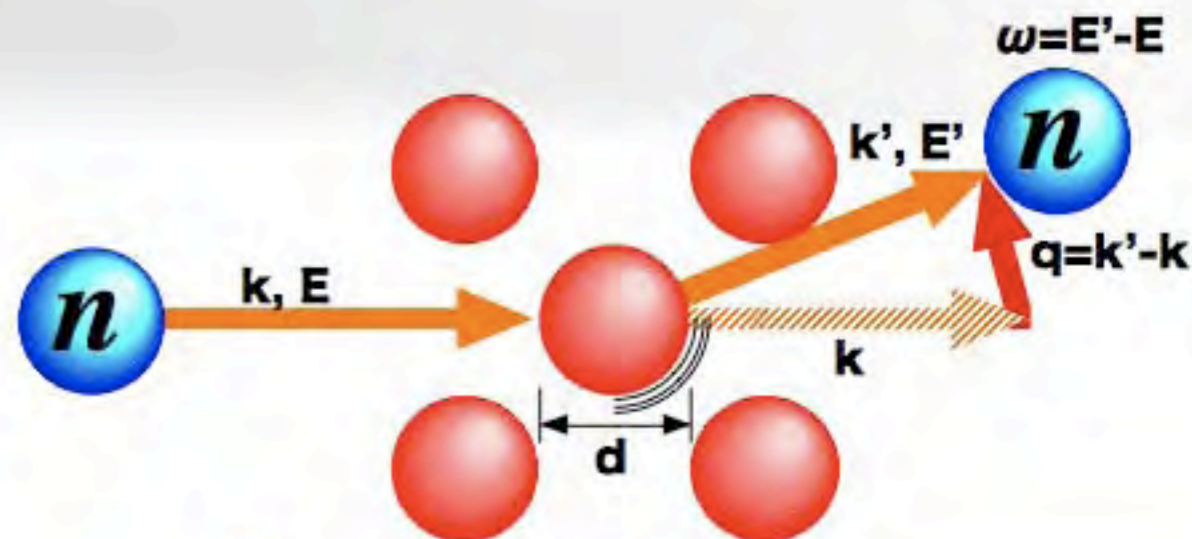
(4) 中性子ビームの特性①-質量

中性子の質量は原子程度です。

中性子の運動量変化の逆数は、対象物の大きさに相当します。
 また対象物のはじかれると、中性子のエネルギーが変化します。
 中性子のエネルギー変化量の逆数は、対象物の変化時間に相当します。



例えば、10nmの対象物を見るときましよう。ちょっとエネルギーの高い1nmの波長を入射粒子に選んだのなら、0.1rad(約5度)の方向に散乱される様子を観察すれば良いです。この時、エックス線ならエネルギーが1000eVくらいになります。これは温度に直したら1000万度にもなりますから、物質を破壊するだけの能力を持っており、試料の状態を大幅に変える危険性がつきまといます。しかし、中性子の場合にはエネルギーが0.001eV程度であり、温度に直すと絶対温度で100度(氷点下170度)に相当します。中性子は試料を破壊せずに観測することに大変適しています。



一般に

質量が同程度だとエネルギーが移行しやすい。

(質量が違うとどちらかがはじかれてしまってエネルギーはあまり移らない。)

物質は原子でできていますから、同程度の質量をもつ中性子が有利です。

(特に高分子や蛋白等の巨大分子やその集団を観察する場合に有利です。)

さらに、運動量とエネルギーの関係が光子や電子とは異なり、試料をミクロに破壊することなく観察できます。

(*) 静止質量がmの粒子の、運動エネルギーEと運動量pの関係は、 $(E + mc^2)^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$ 。

非侵襲・動的状態観察



1-1. 中性子光学基礎

(5) 中性子ビームの特性②-中性

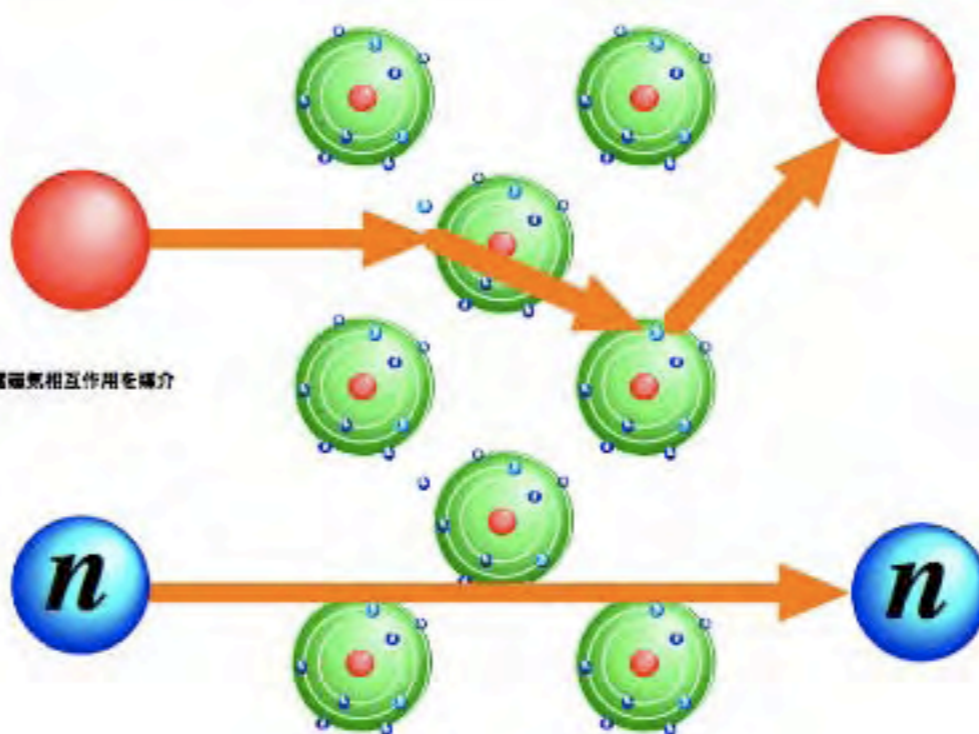
中性子は電荷を持っていません。

物質中には大量の電子が存在します。電子は原子核に束縛されて原子の形をとっていますが、最外殻の電子はちょっとした電氣的相互作用で遊離します。電荷を持つ粒子が物質中に入ると、物質中の電子を擾乱することでエネルギーを使ってしまい、あまり深く侵入できなったり、まっすぐ進めなったりします。また、原子核の電荷で反発されたり散乱されることもありません。

荷電粒子
光子

光子は電荷を持っていませんが、それ自体が電磁気相互作用を媒介する粒子であり、電磁相互作用をします。

中性子



強い物質透過力



1-1. 中性子光学基礎

(6) 中性子ビームの特性③-軽元素識別能力

(電磁気力以外の原子核間の力)

中性子は、物質から主に強い相互作用による散乱を受けます。

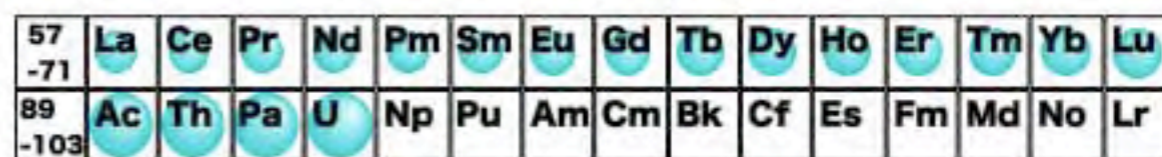
中性子散乱断面積

原子核構造によって複雑に変化します。



エックス線散乱能

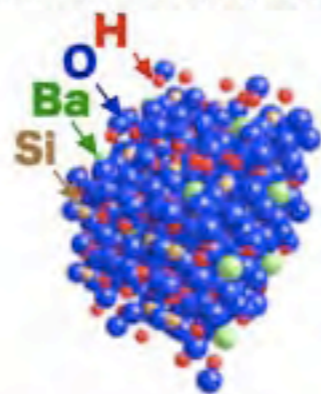
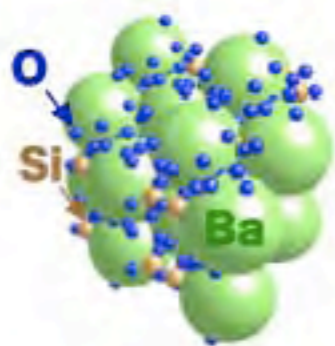
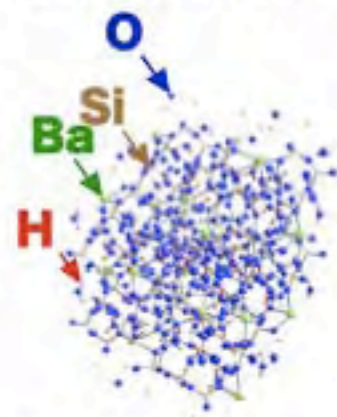
原子番号に従って単調に変化します。



例えば、こんな物質を

エックス線で見ると
重元素がよく見えます

中性子で見ると
軽元素がよく見えます



図ではAlは省略
Ba2[Al4Si12O32]·12H2O

高い軽元素識別能力

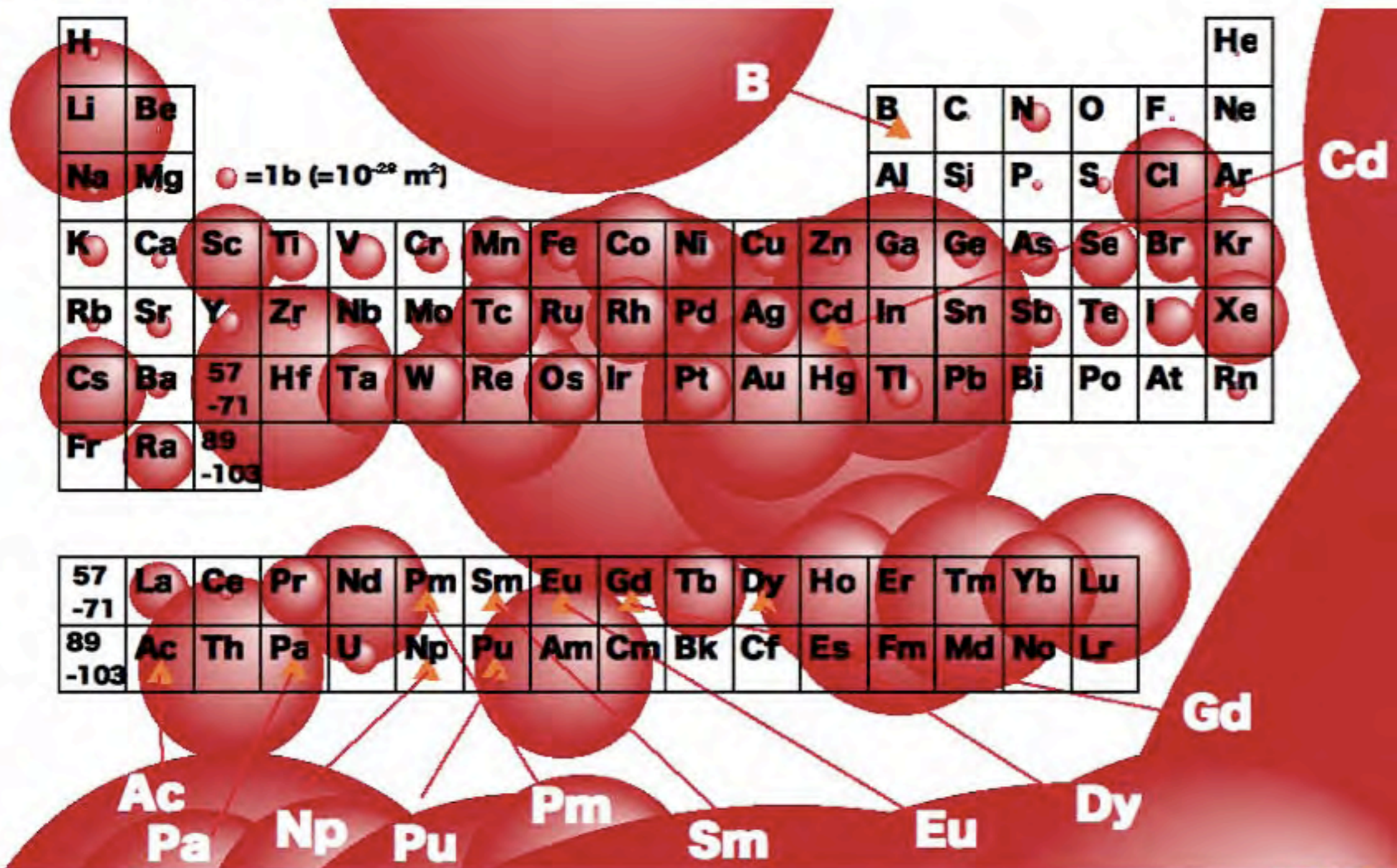


1-1. 中性子光学基礎

(7) 中性子ビームの特性③-軽元素識別能力の続き

吸収断面積も元素によって大きく異なります。

吸収断面積は中性子のエネルギーにも依存します。



1-1. 中性子光学基礎

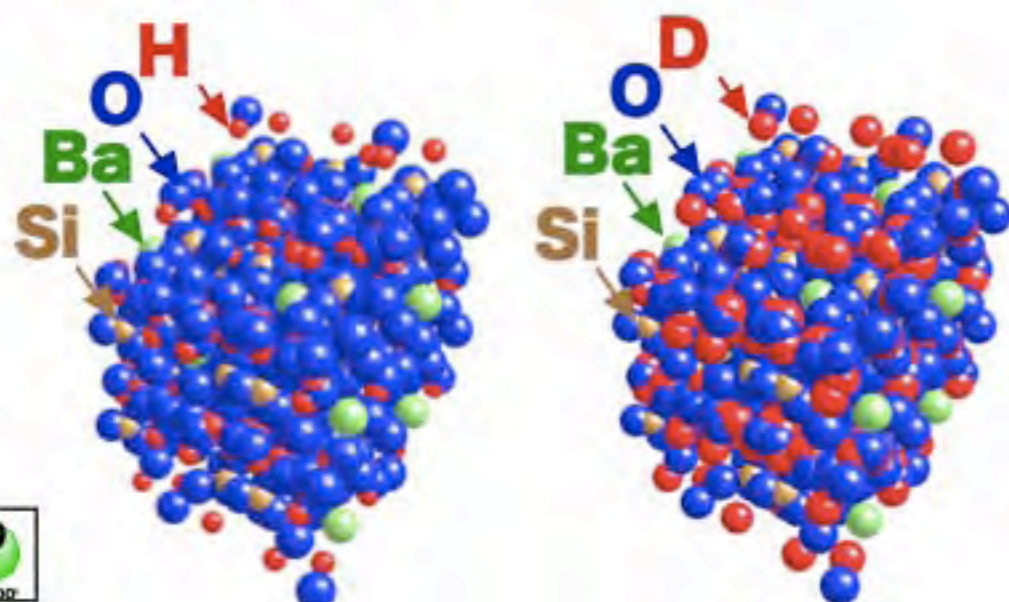
(8) 中性子ビームの特性④-同位体識別能力

散乱断面積も吸収断面積も同位体によって大きく異なります。

散乱における同位体識別

¹ H	² H	
³ He	⁴ He	
0.000138	99.999862	
⁶ Li	⁷ Li	
7.5%	92.5%	
⁹ Be		
100%		
¹⁰ B	¹¹ B	
20.0%	80.0%	
¹² C	¹³ C	
98.90%	1.10%	
¹⁴ N	¹⁵ N	
99.63%	0.37%	
¹⁶ O	¹⁷ O	¹⁸ O
99.762%	0.038%	0.200%
¹⁹ F		
100%		
²⁰ Ne	²¹ Ne	²² Ne
90.51%	0.27%	9.22%

例えば、水素を重水素に置換して中性子散乱パターンを比較すると、水素原子の情報を強調できます。



同位体置換法

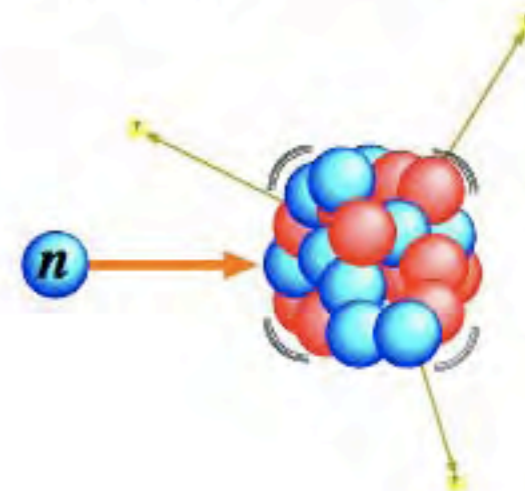
(isotope) contrast variation method

吸収における同位体識別

¹ H	² H	
³ He	⁴ He	
0.000138%	99.999862%	
⁶ Li	⁷ Li	³ He
7.5%	92.5%	
⁹ Be		
100%		
¹⁰ B	¹¹ B	
20.0%	80.0%	
¹² C	¹³ C	
98.90%	1.10%	
¹⁴ N	¹⁵ N	
99.63%	0.37%	
¹⁶ O	¹⁷ O	¹⁸ O
99.762%	0.038%	0.200%
¹⁹ F		
100%		
²⁰ Ne	²¹ Ne	²² Ne
90.51%	0.27%	9.22%

吸収断面積が同位体ごとに異なることから同位体分析を行うことは不可能とは言えませんが、限られた核種のみが含まれている等の特殊な条件が重ならないと困難です。そこで、普通は次のようにします。

原子核が中性子を吸収すると、大半の場合、ガンマ線を発生します。ガンマ線のエネルギースペクトルを測定すると、原子核の種類が特定できるので、元素分析と同位体分析が同時に行われます。



1-1. 中性子光学基礎

(9) 中性子ビームの特性⑤-Sピン

中性子のスピンは1/2です。

電荷を持っていませんが、中性子の内部構造に起因する異常磁気双極子能率を持っています。

磁気双極子能率の向きはスピンと反平行です。

磁気双極子能率が受ける磁気散乱

中性子は磁気双極子能率を持つために、物質中の電子が作り出す磁場によって散乱を受けます。これを磁気散乱と呼びます。磁気散乱のパターンを観測することによって、物質中の磁気的な構造を知ることができます。

中性子磁気散乱は、物質中の磁気構造を直接観測する有力な手段であり、中性子科学の中の重要な研究分野の一つです。

0でないスピンを持つ原子核からの散乱は、中性子スピンと原子核スピンの平行な場合と反平行な場合で異なります。

試料中の水素原子核のスピンを偏極して、中性子スピンを平行及び反平行にした場合の中性子散乱パターンを比較すると、水素原子の情報を強調できます。

実際にはスピン反平行の場合の水素原子核の散乱長は負なので、球の大きさから読み取れる以上の差異があります。

中性子磁気散乱

スピンコントラスト法

spin contrast variation method



1-1. 中性子光学基礎

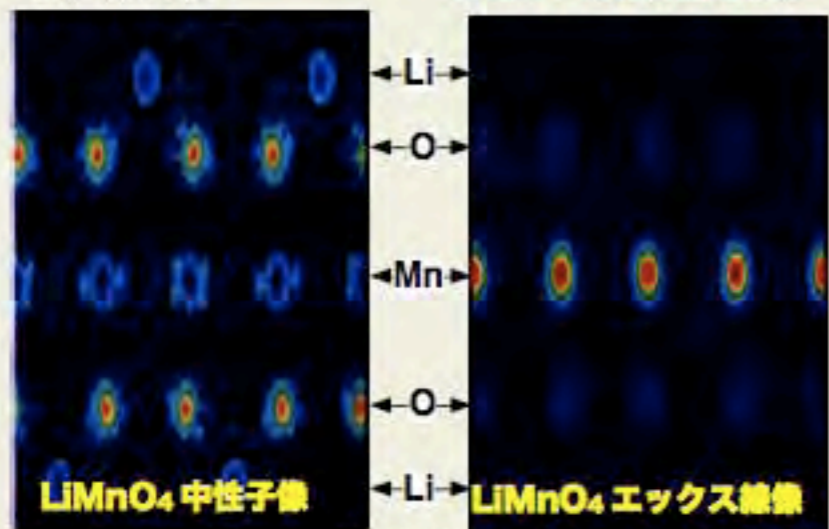
(10) 中性子の利用例

① 中性子散乱

構造解析：中性子回折

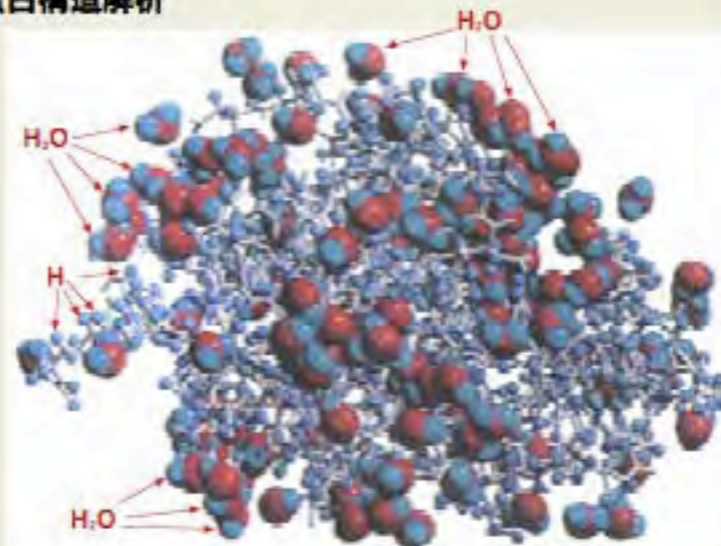
リチウム電池

特性③：軽元素識別能力



エックス線では確認が困難なリチウム原子の位置が、中性子では明瞭に観測されます。

蛋白構造解析

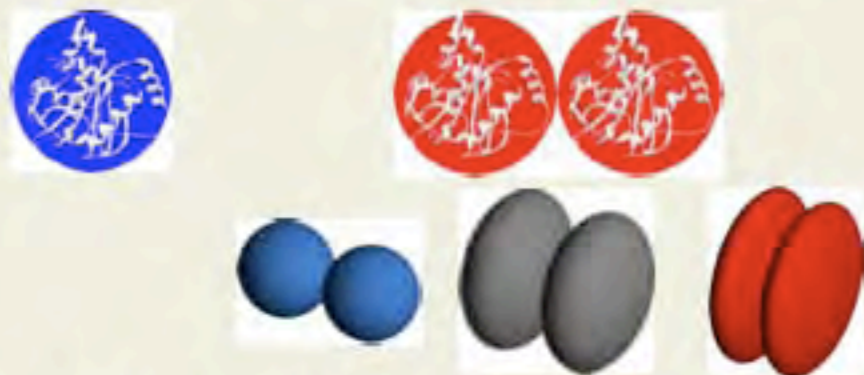


特性③：軽元素識別能力

特性④：同位体識別能力

水素や酸素に対する高い感度を用いて、重水素置換を利用しながら、蛋白分子の水素位置を実験的に決定したり、水和水位置を決定できます。

溶液中蛋白分子会合状態：中性子小角散乱



特性①：質量

特性②：中性

特性③：軽元素識別能力

特性④：同位体識別能力

高分子・ガラス：中性子準弾性散乱、非弾性散乱

特性①：質量 特性②：中性

特性③：軽元素識別能力 特性④：同位体識別能力

磁性：中性子磁気散乱

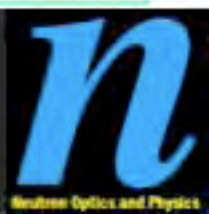
特性⑤：スピン

表面・界面：中性子反射率測定

特性①：質量 特性②：中性

特性③：軽元素識別能力 特性④：同位体識別能力

詳細な構造が未知だとしても、巨大な分子が取っているおおよその大きさと形状が分かります。重水中での状態であれば、目的の分子だけを強調して観察することが可能です。また、分子同士が対になっていたり、クラスター化している様子が観察できる場合があります。特に溶液中での蛋白分子の会合状態のような極めてゆるい結合の場合に、エックス線で観察を試みると状態を変化させかねません。しかし、中性子は運動エネルギーが低いので、状態を変化させずに観察することが期待されます（非侵襲観察）。



1-1. 中性子光学基礎

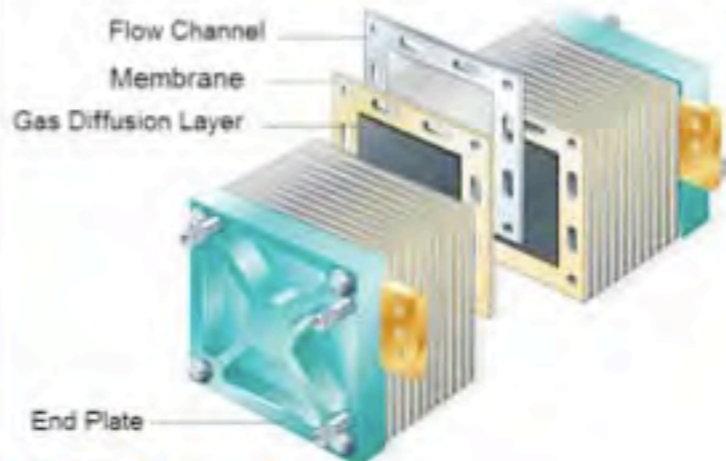
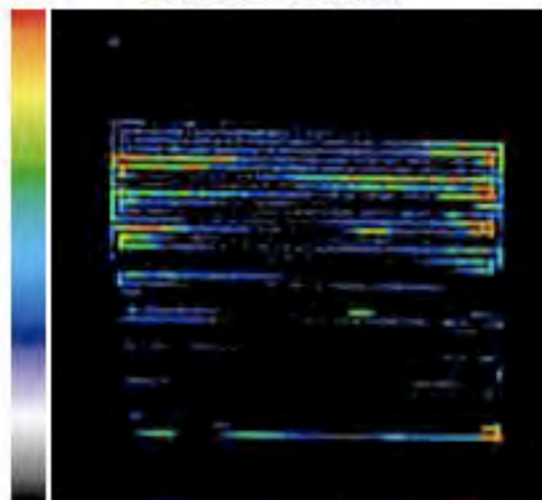
(11) 中性子の利用例 (続き)

② 中性子ラジオグラフィ

中性子を使って透視する手法を中性子ラジオグラフィと呼びます。

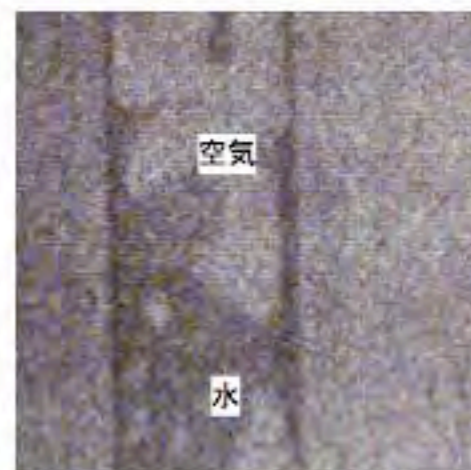
High

燃料電池の水排出



特性②：中性

特性③：軽元素識別能力



金属管中の水の透視が可能です。その他に、核燃料棒内部の透視、ロケット内の燃料、溶接部の内部歪み、エンジン内部の燃料の動きの観察等が可能だと言われています。

Low



水素が燃焼してできた水がどのように流れどこで滞っているかを、製品の状態でそのまま透視できます。

③ 即発ガンマ線分析

特性②：中性

特性④：同位体識別能力

即発ガンマ線分析は、中性子が試料内の原子核に吸収された際に発生するガンマ線のエネルギースペクトルから、試料中に含まれる元素あるいは同位体を定量的に分析する、微量分析の一種です。中性子は物質透過力が強いので、表面だけでなく深部まで非破壊で分析できます。

④ 中性子捕獲医療

特性②：中性

特性③：軽元素識別能力

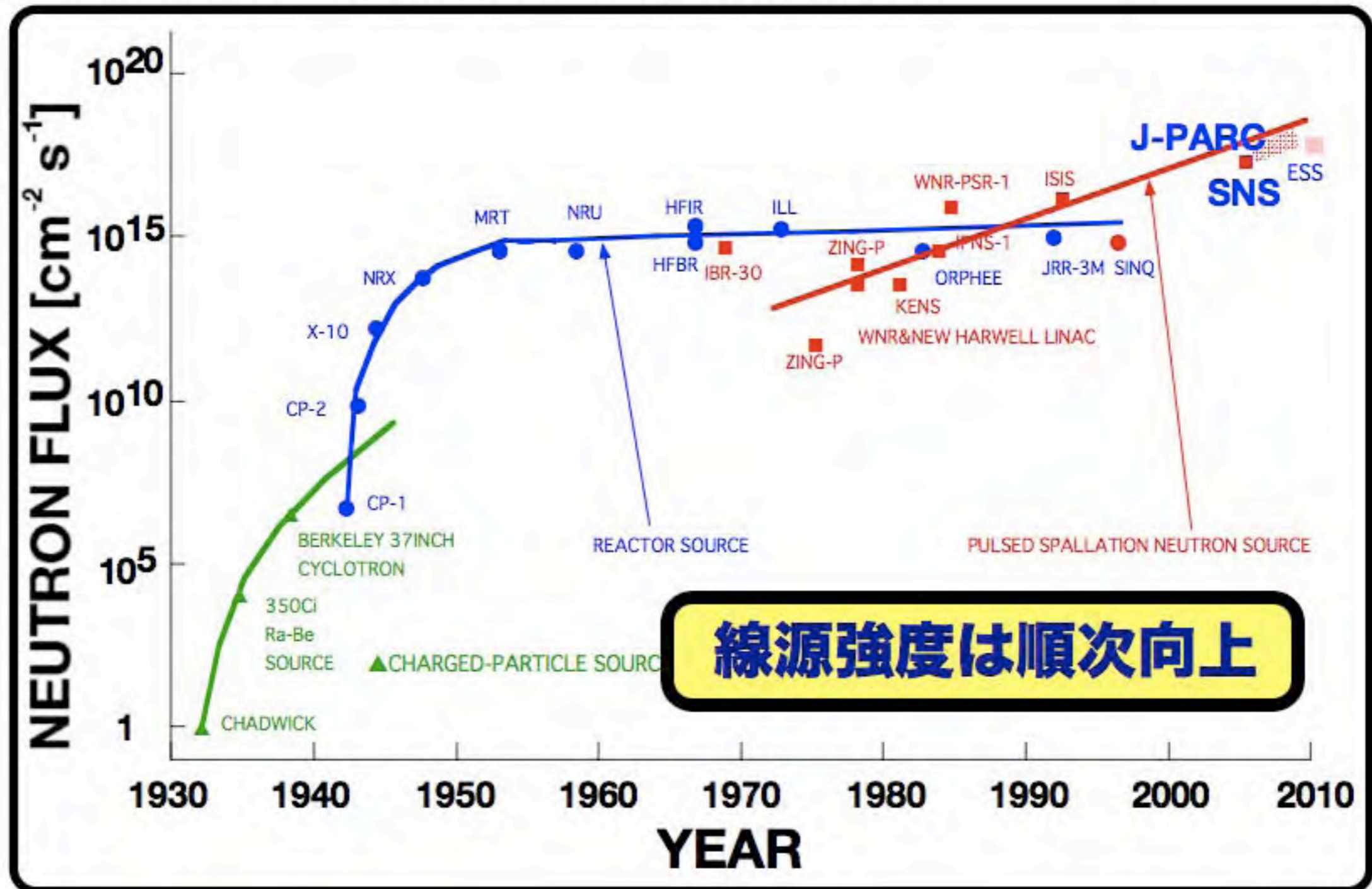
中性子が体内に吸収された時におこる中性子捕獲反応によって生じるエネルギーで、癌組織等を破壊することができます。中性子自身が持っている運動エネルギーは小さく、通過するだけなら人体組織に損傷をあまり与えません。中性子が吸収されて核反応が起こると、集中的にエネルギーが解放されます。患部に反応を起こしやすい元素を集中することで、効率的な治療が可能です。



1-1. 中性子光学基礎

(12) 中性子利用効率

生体に関わる物質の研究の発展が期待される中、軽い元素に高い感度を持つ中性子の重要性はこれから増す一方です。しかし、中性子はX線ほどに普及していない。その理由の一つにビーム強度の弱さがあります。

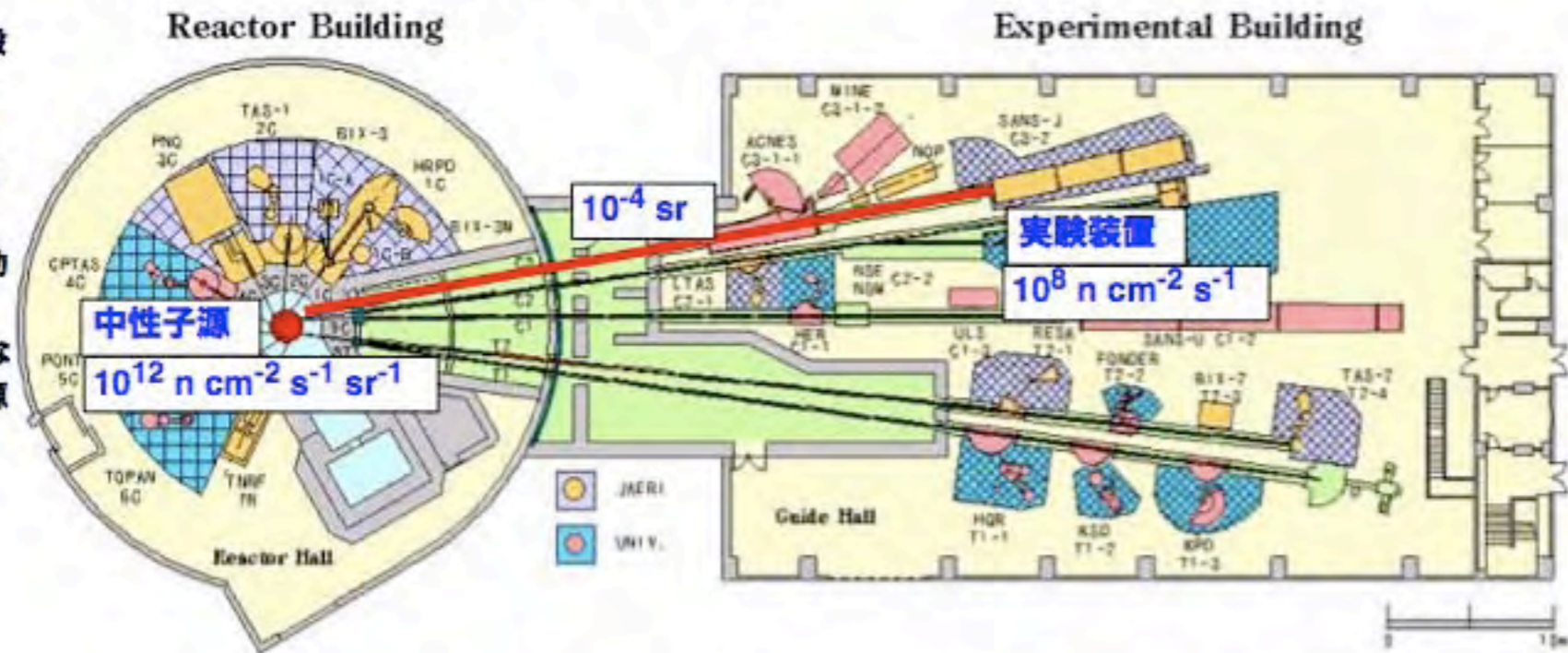


1-1. 中性子光学基礎

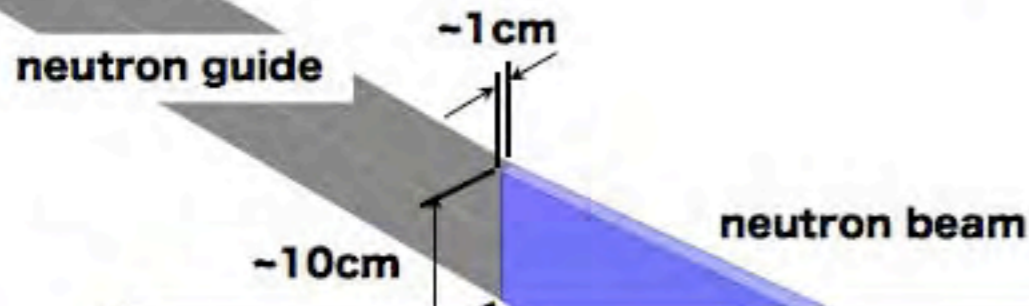
(12) 中性子利用効率

生体に関わる物質の研究の発展が期待される中、軽い元素に高い感度を持つ中性子の重要性はこれから増す一方です。しかし、中性子はX線ほどに普及していない。その理由の一つにビーム強度の弱さがあります。

日本原子力研究所の研究用原子炉JRR-3の装置配置図です。一般に、中性子源の大きさは概ね10cm程度で、ほとんど指向性がない、ぼやけた光源です。様々な装置群が中性子源に向かって配置されている様子が分かります。中性子導管を使って2cm×20cm程度の大きさのビームを遠くまで輸送し、装置同士が互いを避けて配置できるようにしています。輸送時の取り込み立体角は、実効的に 10^{-4} sr程度です。実験装置に届いたビームは単色化したり、コリメートすることが多く、実験で使用できる中性子はさらに少なくなってしまう。実験の種類に大きく依存しますが、中性子源表面から出発したすべての中性子のうち、100万分の1程度が実験に使用されているにすぎないと考えられます。



JRR-3M Beam Experimental Facilities 2002.5



実際に、試料に当たって科学的な情報を持ち出して検出・解析されて、科学的な知識を得るのに利用される中性子の総量は、中性子源

ほとんどの中性子は利用されることなく捨てられる

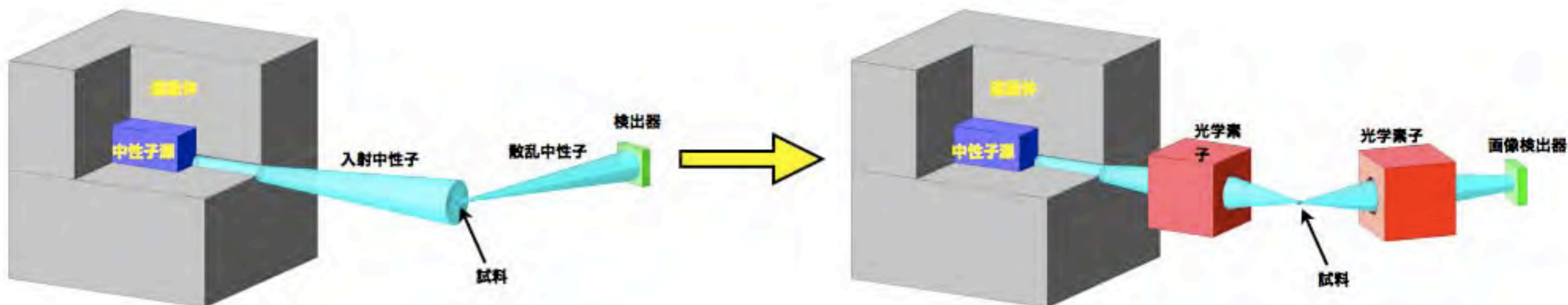
先進的中性子光学 → 利用効率の格段の向上



1-1. 中性子光学基礎

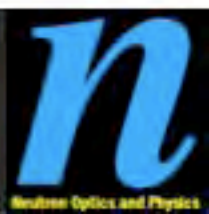
(13) 中性子光学の必要性・有効性

中性子光学は、中性子の取り出し及びビーム輸送の効率を格段に向上させ、また試料の持つ物質科学的に重要な情報を担う散乱中性子の情報を最大限引き出すために使われ、最終的に物質科学的測定量の測定精度を達成するために必要な測定時間や照射中性子総量等を低減します。



これによって、中性子の利用効率を最大化することは、強力な原子炉や加速器を建設したのと同じ効果を持ちます。

中性子光学と周辺基盤技術は、中性子利用効率を桁違いに改善します。

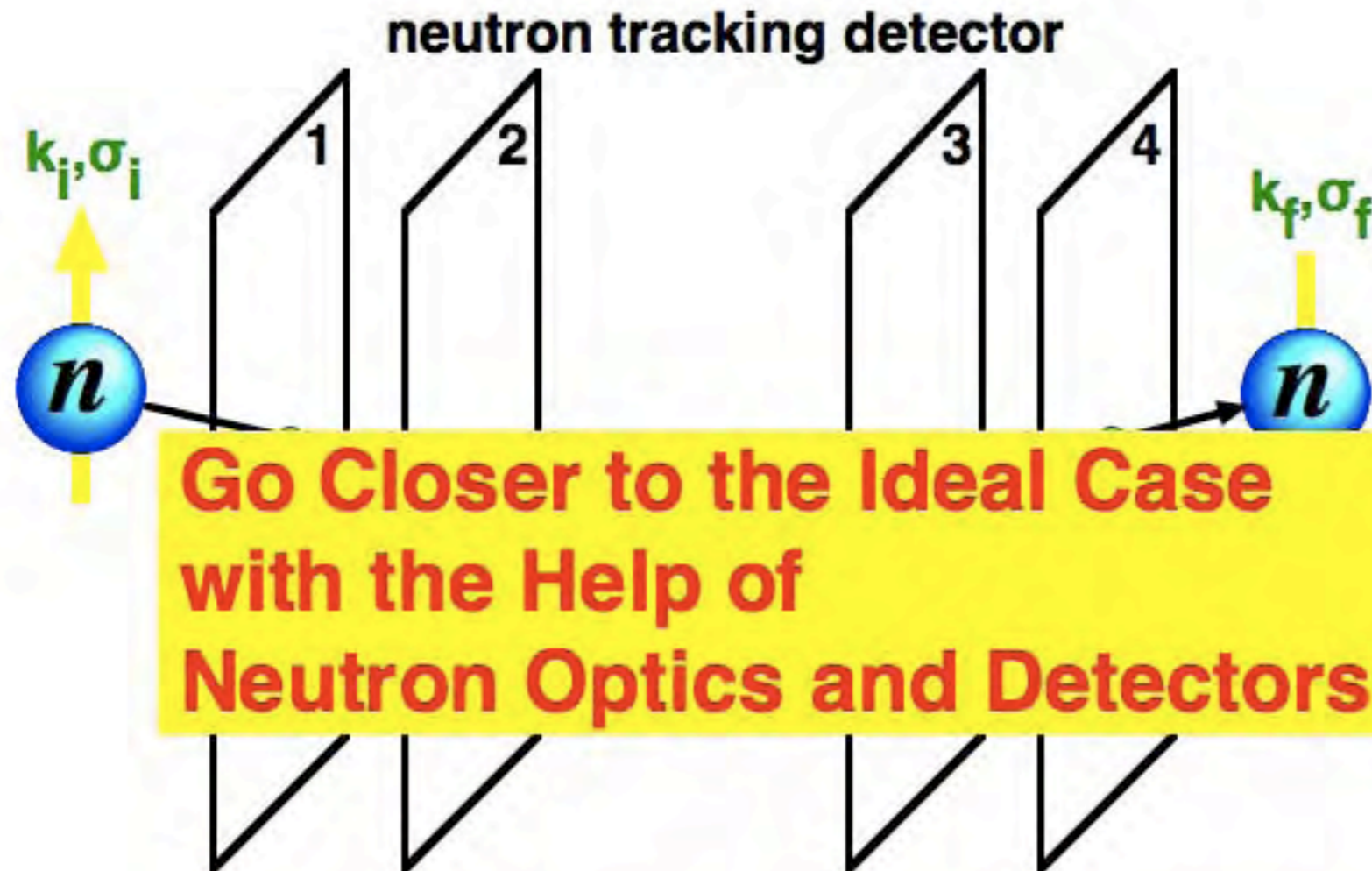


1-1. 中性子光学基礎

(12) 中性子利用効率

もう一つのブレークスルー

Ideal Neutron Scattering
100% Utilization Efficiency



picking up the induction by neutron magnetic moment!?



1-1. 中性子光学基礎

(14) 中性子光学研究プロジェクト(NOP)

平成12年度から5年間にわたって、科学技術振興調整費知的基盤整備推進制度において、理化学研究所が中核機関となって「中性子光学素子の開発と応用」という研究が推進されました。その結果、中性子高度利用に関する基盤技術において、世界をリードする研究成果が蓄積されました。

「中性子光学素子の開発と応用」

The Development and Application of Neutron Optics
(The NOP Collaboration)



FY2000-2004 : Special
Coordination Funds for
promoting the Ministry of
Education, Culture, Sports,
Science and Technology of
the Japanese Government

研究項目

- 反射光学 (高 m 値スーパーミラー、曲面スーパーミラー)
- 屈折光学 (物質界面屈折光学、磁気光学)
- 干渉光学 (多層膜干渉光学)
- 回折光学
- 周辺技術 (画像検出器、試料核偏極)
- 応用研究 (新実験手法開拓と実証)



RIKEN (The Institute of Physical and Chemical Research)
理化学研究所



KUR : Kyoto University Reactor Research Institute
京都大学原子炉実験所



JAERI : Japan Atomic Energy Research Institute
日本原子力研究所



Hokkaido University
北海道大学



KEK : High Energy Accelerator Research Organization
高エネルギー加速器研究機構



ISSP : The Institute of Solid State Physics, The University of Tokyo
東京大学物性研究所



TOSHIBA Corporation
東芝



原子核による低エネルギー中性子(s波)の散乱

散乱状態の波動関数

$$\psi = e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} + f(\theta)\frac{e^{ikr}}{r}$$

$$k = \frac{m_A}{m_n + m_A} \frac{\sqrt{2m_n E}}$$

ポテンシャル

$$U_{\text{nucl}}(r) = \begin{cases} -U_0 & (r < r_0) \\ 0 & (r > r_0) \end{cases}$$

ボルン近似

$$f(\theta) = -\frac{m}{2\pi\hbar^2} \int d^3r U_{\text{nucl}}(r) e^{i(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_f)\cdot\mathbf{r}}$$

角度依存性はないので $a = -f(\theta)$ において、散乱長と呼ぶ

$$\Rightarrow -a = \frac{2m}{3\hbar^2} U_0 r_0^3$$

一方で

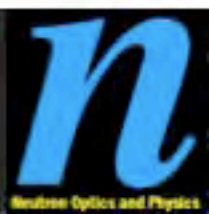
$$\int U_{\text{nucl}}(r) d^3r = -U_0 \frac{4\pi}{3} r_0^3$$

結局

$$U_{\text{nucl}}(r) = \frac{2\pi\hbar^2 a}{m} \delta(\mathbf{r}) \quad \text{と書ける}$$

断面積との関係

$$\sigma_s = 4\pi(\text{Re } a)^2 \quad \sigma_a = -\frac{4\pi}{k} \text{Im } a$$



物質による低エネルギー中性子(s波)の散乱

散乱状態の波動関数

$$\psi(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r}} - \sum_i b_i \psi_i(\mathbf{r}_i) \frac{e^{ik_0|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}$$

ポテンシャル

$$U(\mathbf{r}) = \frac{2\pi\hbar^2}{m_n} \sum_i b_i \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)$$

$$b = \frac{m_A + m_n}{m_A} a + Zb_{ne}$$

$\psi_i(\mathbf{r}_i) = \psi(\mathbf{r}_i)$ と近似すると $\psi(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r}} - \int \psi(\mathbf{r}') \beta(\mathbf{r}') \frac{e^{ik_0|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} d^3r'$

$k_0 = \frac{\sqrt{2m_n E}}{\hbar}$ とおいて、シュレーディンガー方程式 $\left(-\frac{\hbar^2}{2m_n} \nabla^2 + \frac{2\pi\hbar^2}{m_n} \beta(\mathbf{r})\right) \psi = E\psi$ に代入すると

散乱長が**b**の原子が数密度**N**で一様に分布しているとするれば、 $\beta(\mathbf{r}) = bN$ なので

$$U = \frac{2\pi\hbar^2}{m_n} bN \quad \text{とおけば良いことになる}$$

複数の核種が混在する場合には

$$U = \frac{2\pi\hbar^2}{m_n} \sum_i b_i N_i \quad \text{とおけば良い}$$



1-1. 中性子光学基礎

(15) 中性子反射光学

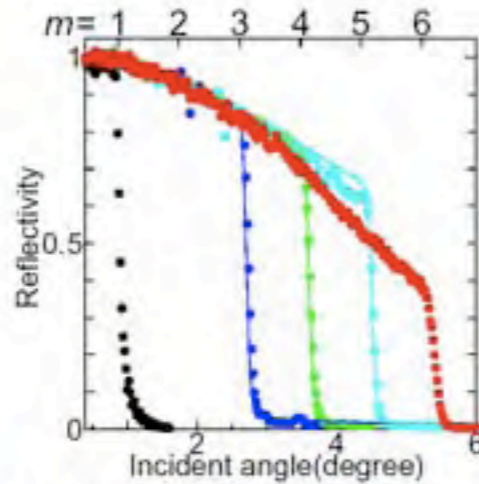
中性子反射光学は、物質界面における中性子の全反射を利用する光学系で、最も広く利用されています。波長依存性が小さいことを特徴とし、スーパーミラーが一般的です。

スーパーミラーのm値は、2000年代前半に急速に大きくなり、m=6までの実証がなされています。またm=10に匹敵する極薄多層膜を作成できる制御技術が実証されています。

曲面形状のスーパーミラーの試作も行われています。下の写真は、m=1.5の回転放物面スーパーミラーです。

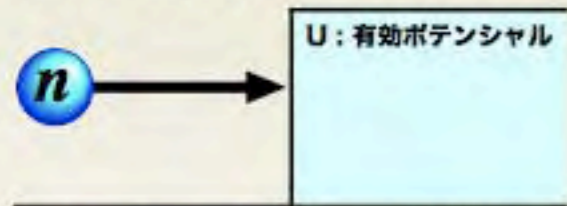
m=6

m=6とは、面垂直方向に約40m/sの速度で入射した中性子を反射する能力を持つことを意味します。



中性子の全反射

中性子は、物質に侵入する時に、“有効ポテンシャル”を乗り越える必要があります。“有効ポテンシャル”の値は100neVのオーダーですから、熱中性子や冷中性子の持つ運動エネルギーに比べれば大変小さな量です。しかし、熱中性子や冷中性子が界面にほぼ平行に入射する場合には、界面方向の運動量が大変小さく、“有効ポテンシャル”を超えられなくなり、全反射を起こします。



“有効ポテンシャル”は、原子核ポテンシャルを体積平均したもので、次式で与えられます。

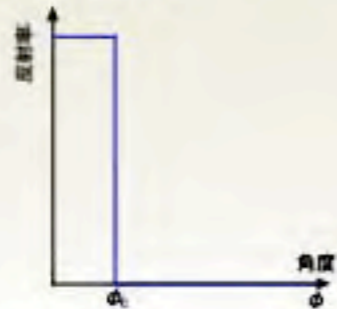
$$U = \frac{2\pi\hbar^2}{m_n} bN$$

m_n : 中性子質量
 b : 散乱長
 N : 原子核数密度

全反射臨界角

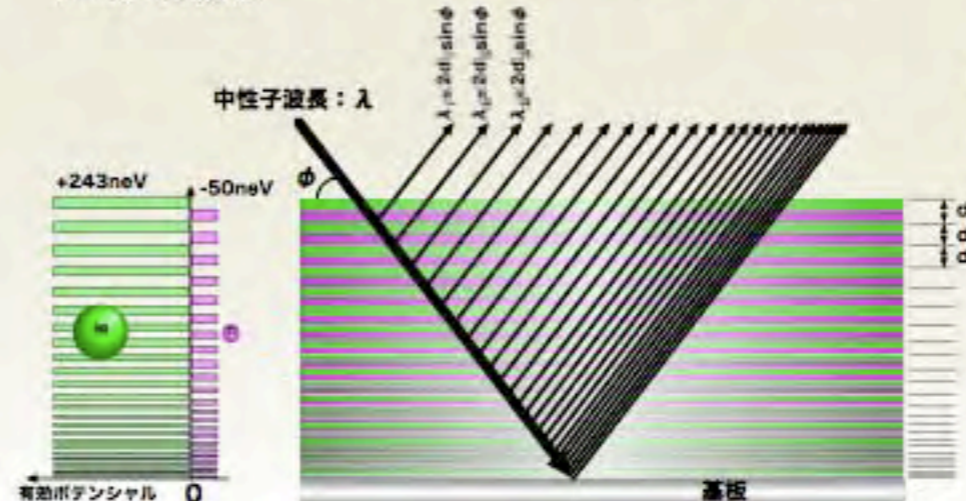


中性子が界面上図のように入射したときの中性子の反射率は、下図のようになります。全反射の限界の角度phiを全反射臨界角と呼びます。



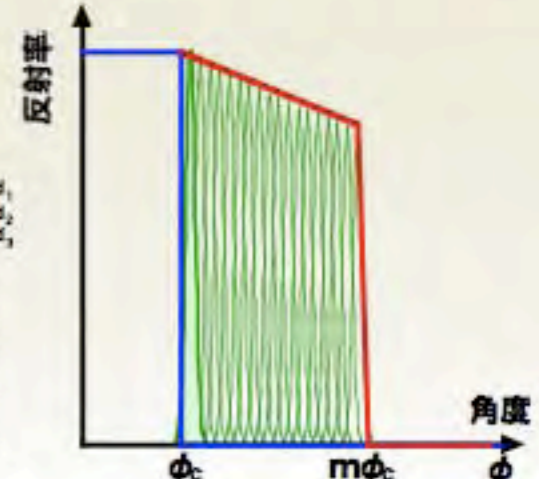
スーパーミラー

“有効ポテンシャル”が異なる物質を層状に並べると、その層間に対応したブラッグ散乱が起こります。層の厚みを徐々に変化させると、ある角度範囲にブラッグ散乱を連続的に分布させることができます。これによって、通常の反射臨界角よりも大きな反射角で中性子を反射できるようにしたミラーをスーパーミラーと呼びます。



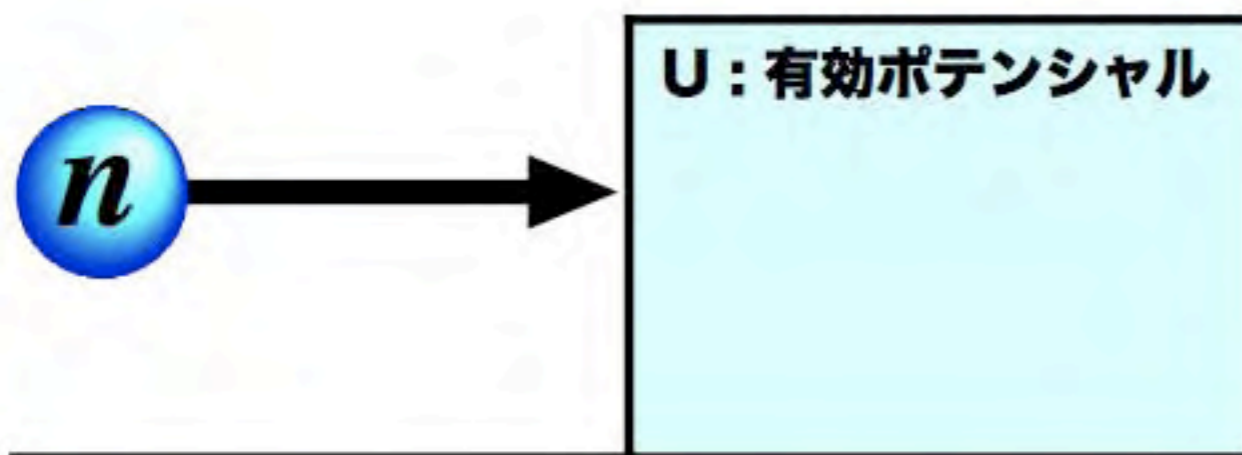
スーパーミラーのm値

単純界面の場合に比べて、何倍の角度まで反射できるようになったかという値mをスーパーミラーのm値と呼びます。またそのミラーをmQcスーパーミラーと呼ぶこともしばしばあります。



中性子の全反射

中性子は、物質に侵入する時に、“有効ポテンシャル”を乗り越える必要があります。“有効ポテンシャル”の値は100neVのオーダーですから、熱中性子や冷中性子の持つ運動エネルギーに比べれば大変小さな量です。しかし、熱中性子や冷中性子が界面にほぼ平行に入射する場合には、界面方向の運動量が小さく、“有効ポテンシャル”を超えられなくなり、全反射を起こします。

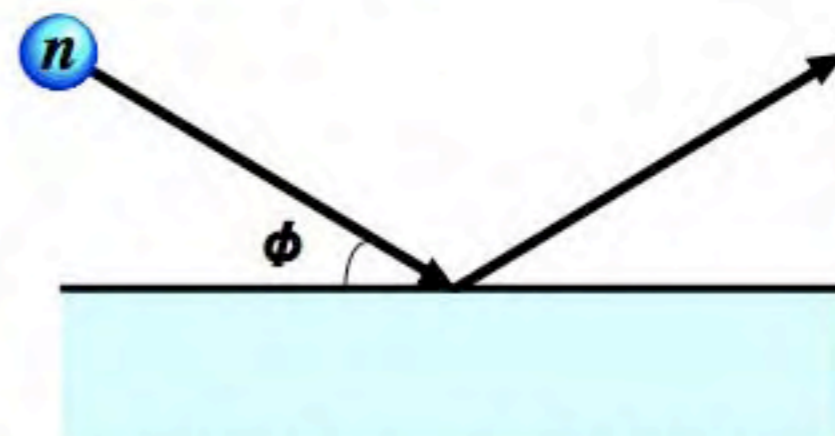


“有効ポテンシャル”は、原子核ポテンシャルを体積平均したもので、次式で与られます。

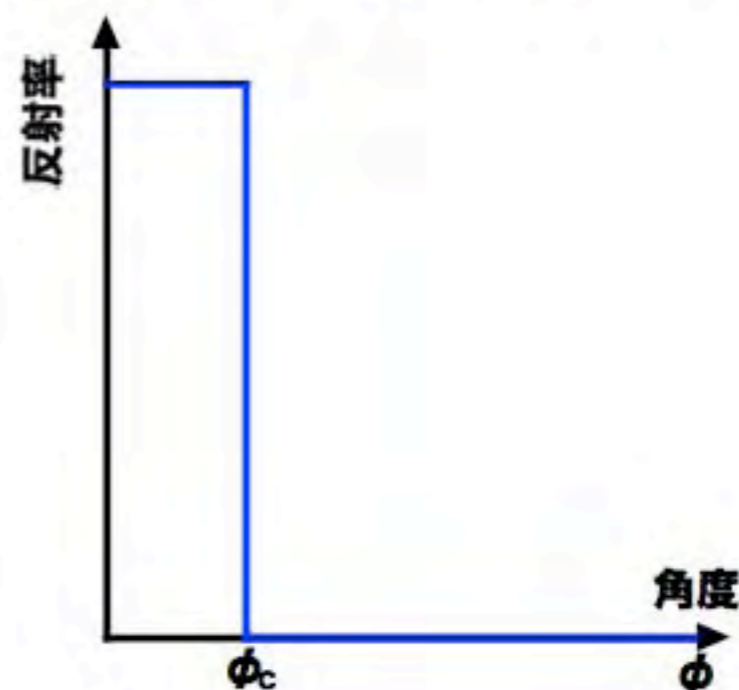
$$U = \frac{2\pi\hbar^2}{m_n} bN$$

m_n : 中性子質量
 b : 散乱長
 N : 原子核数密度

全反射臨界角

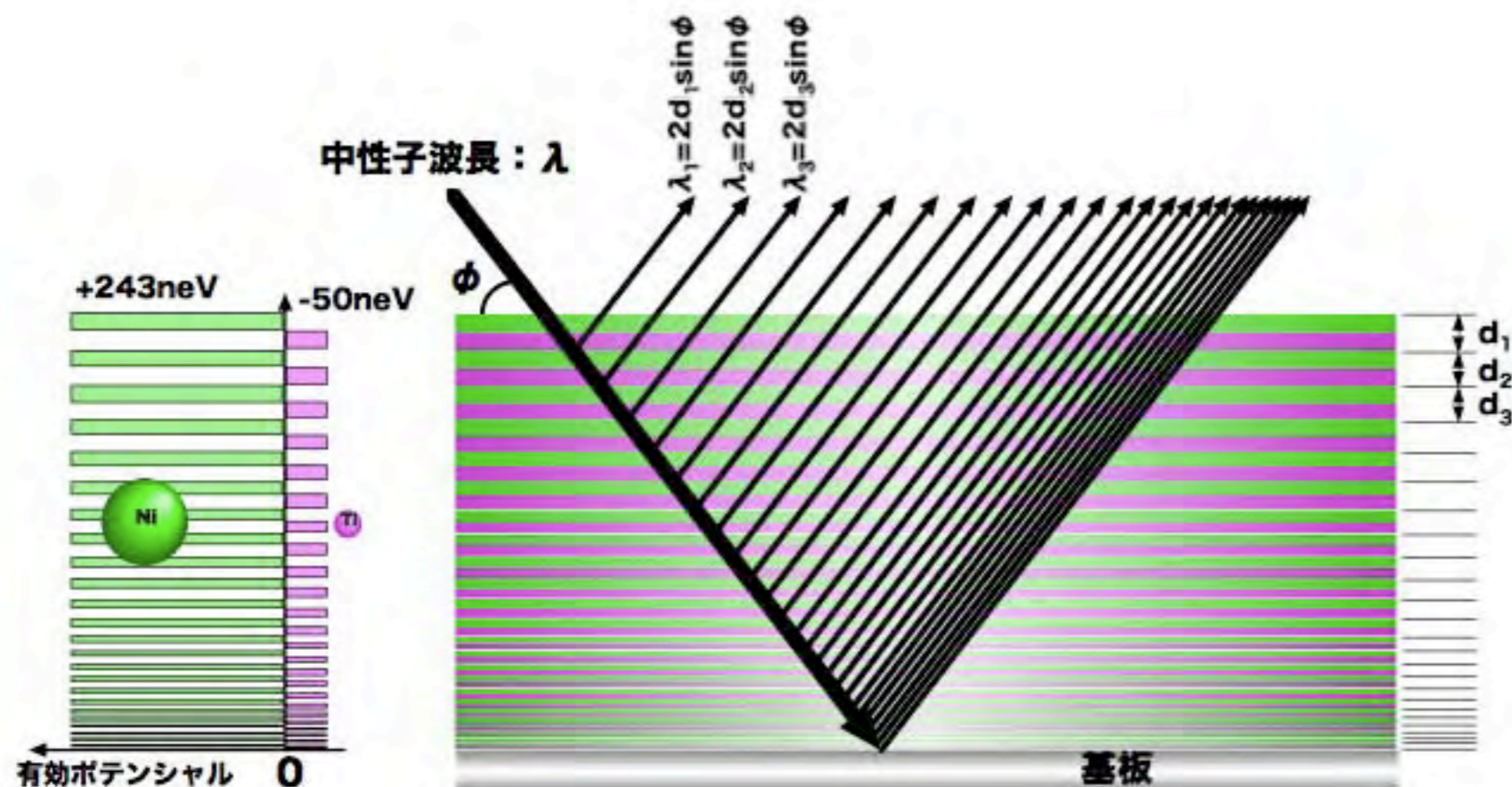


中性子が界面に上図のように入射したときの中性子の反射率は、下図のようになります。全反射の限界の角度φを全反射臨界角と呼びます。



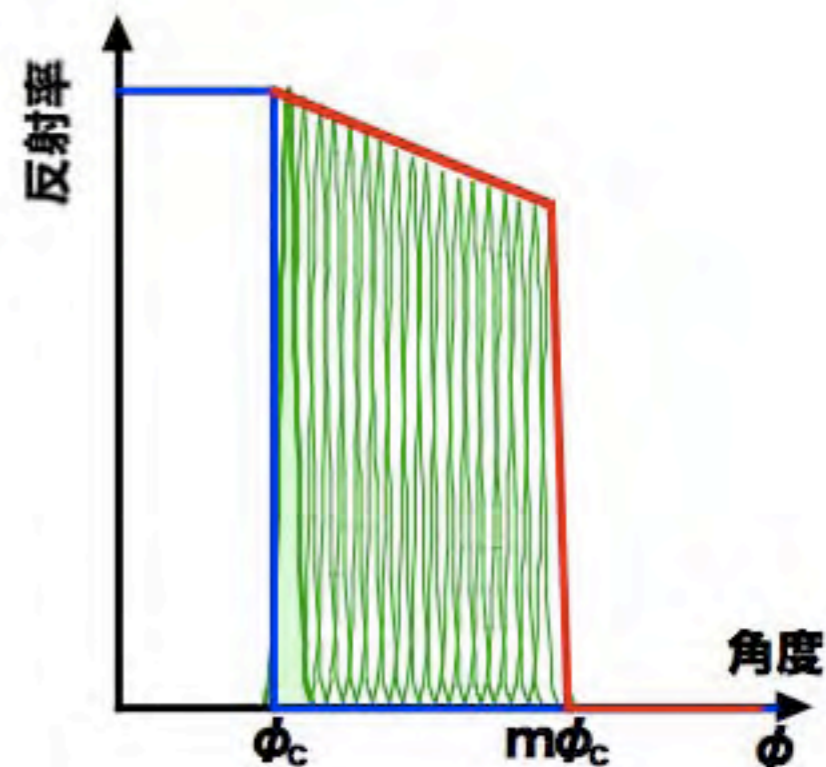
スーパーミラー

“有効ポテンシャル”が異なる物質を層状に並べると、その周期に対応したブラッグ散乱が起こります。層の厚みを徐々に変化させると、ある角度範囲にブラッグ散乱を連続的に分布させることができます。これによって、通常の反射臨界角よりも大きな反射角で中性子を反射できるようにしたミラーをスーパーミラーと呼びます。



スーパーミラーのm値

単純界面の場合に比べて、何倍の角度まで反射できるようになったかという値mをスーパーミラーのm値と呼びます。またそのミラーをmQcスーパーミラーと呼ぶこともしばしばあります。

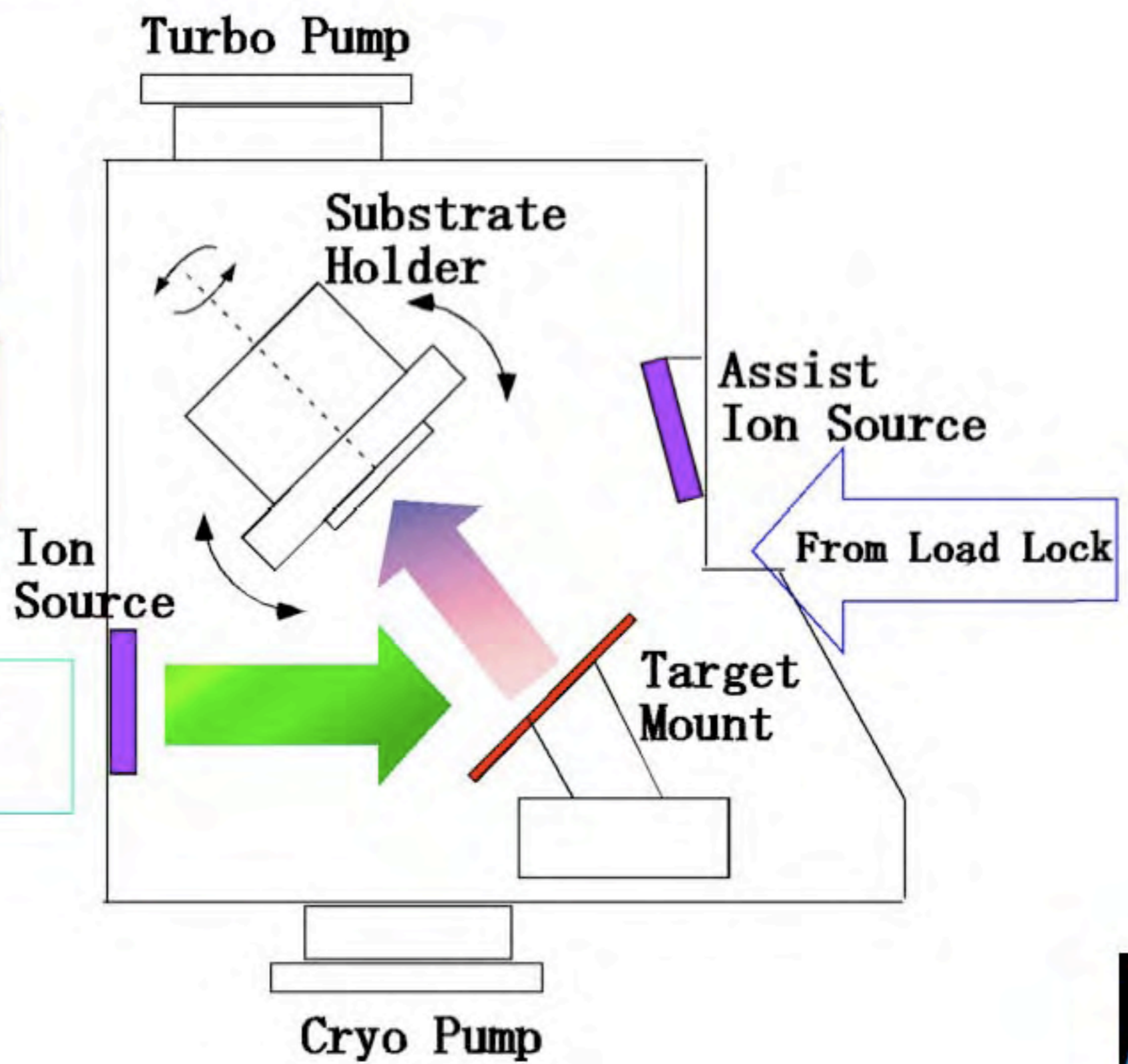


Schematic view of the chamber of ion beam sputtering machine

Base pressure
 $\sim 3.0 \times 10^{-8}$ Torr

Process pressure
 $\sim 8.0 \times 10^{-5}$ Torr

Maximum Sample size
 $\Phi 8'' (\Phi 200\text{mm})$

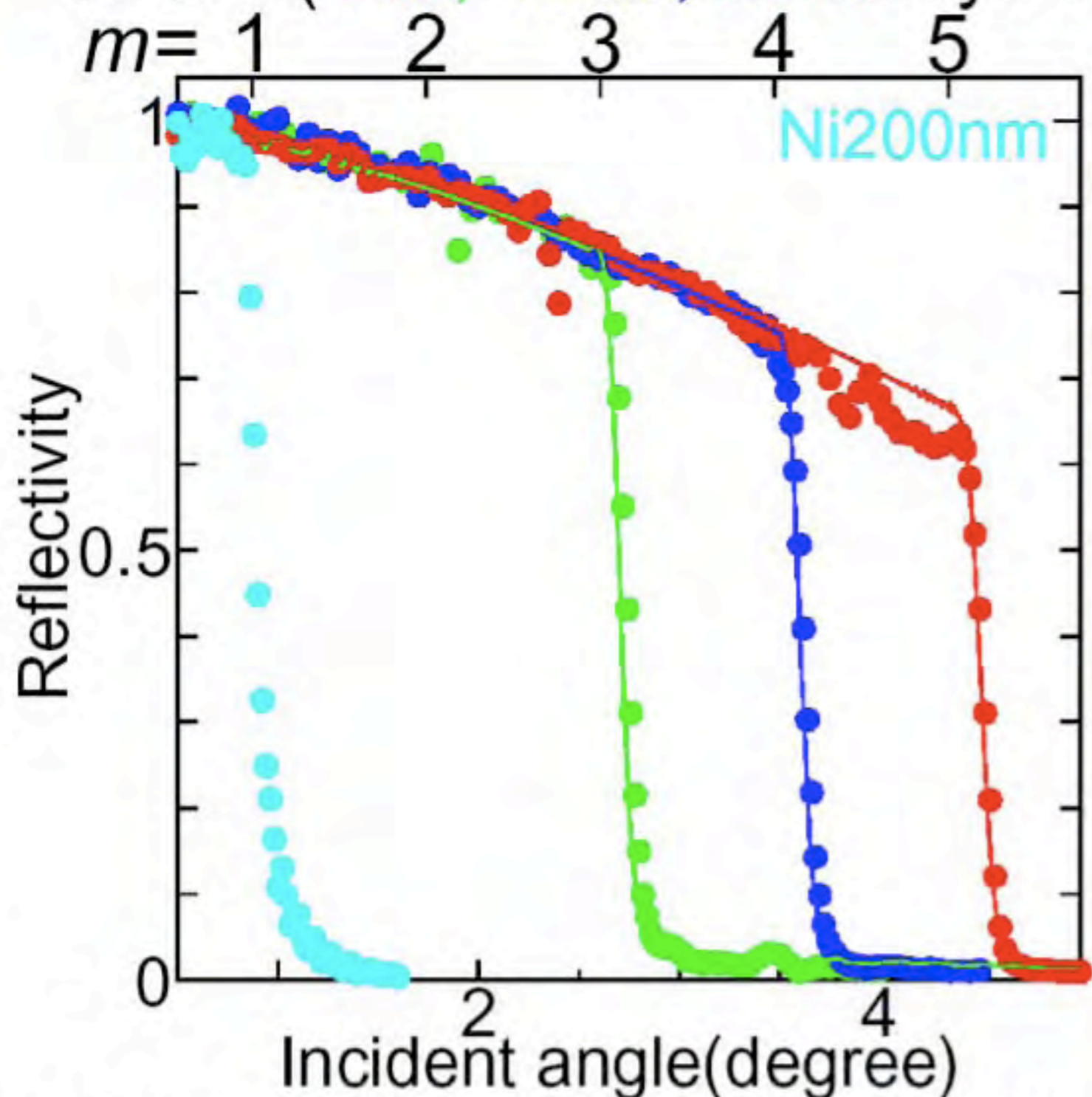


Estimation of $m=3, 4, 5$

NiC/Ti supermirror with DW factor

NiC/Ti (400, 1200, 3000 layers)

DW factor

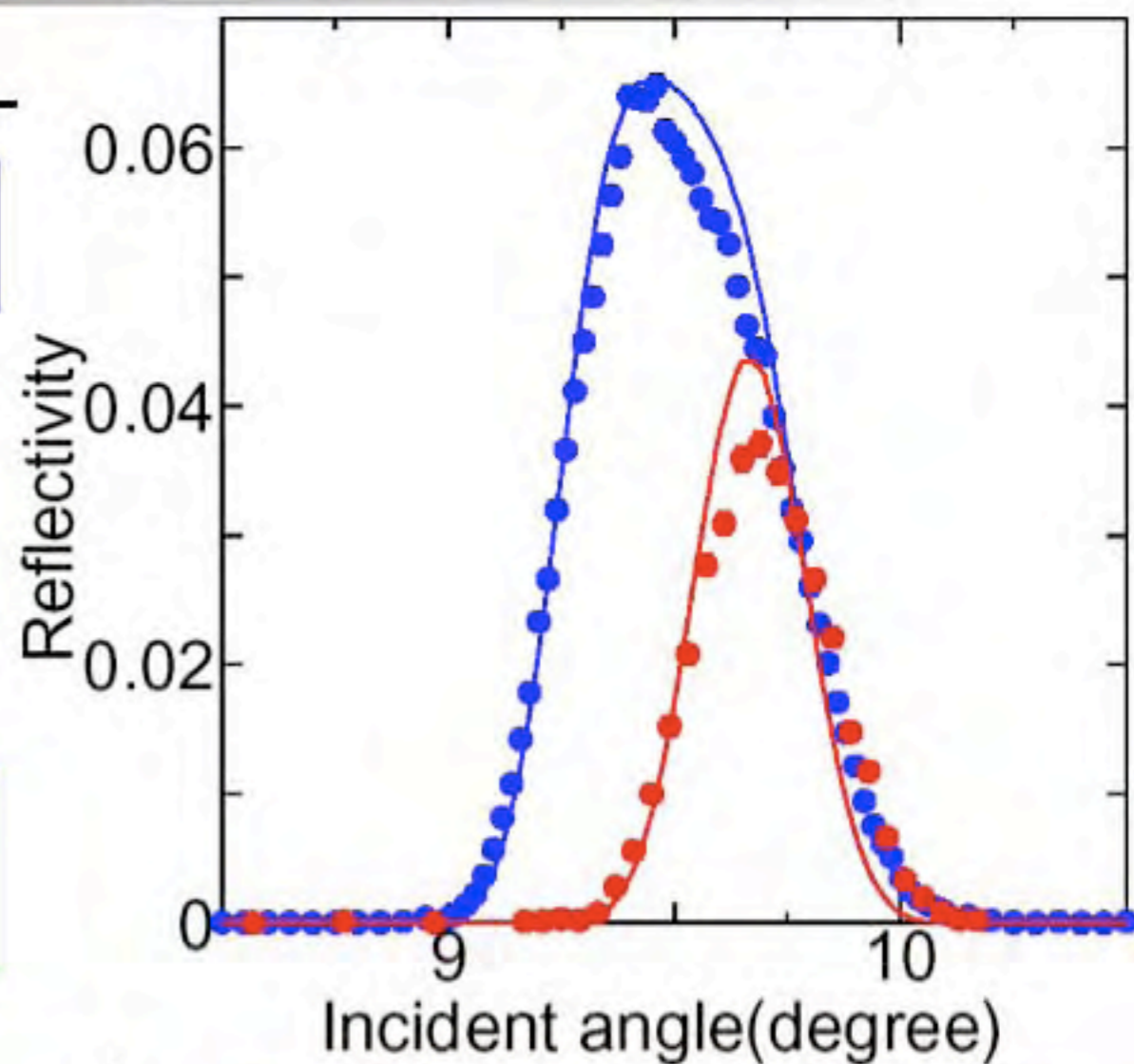
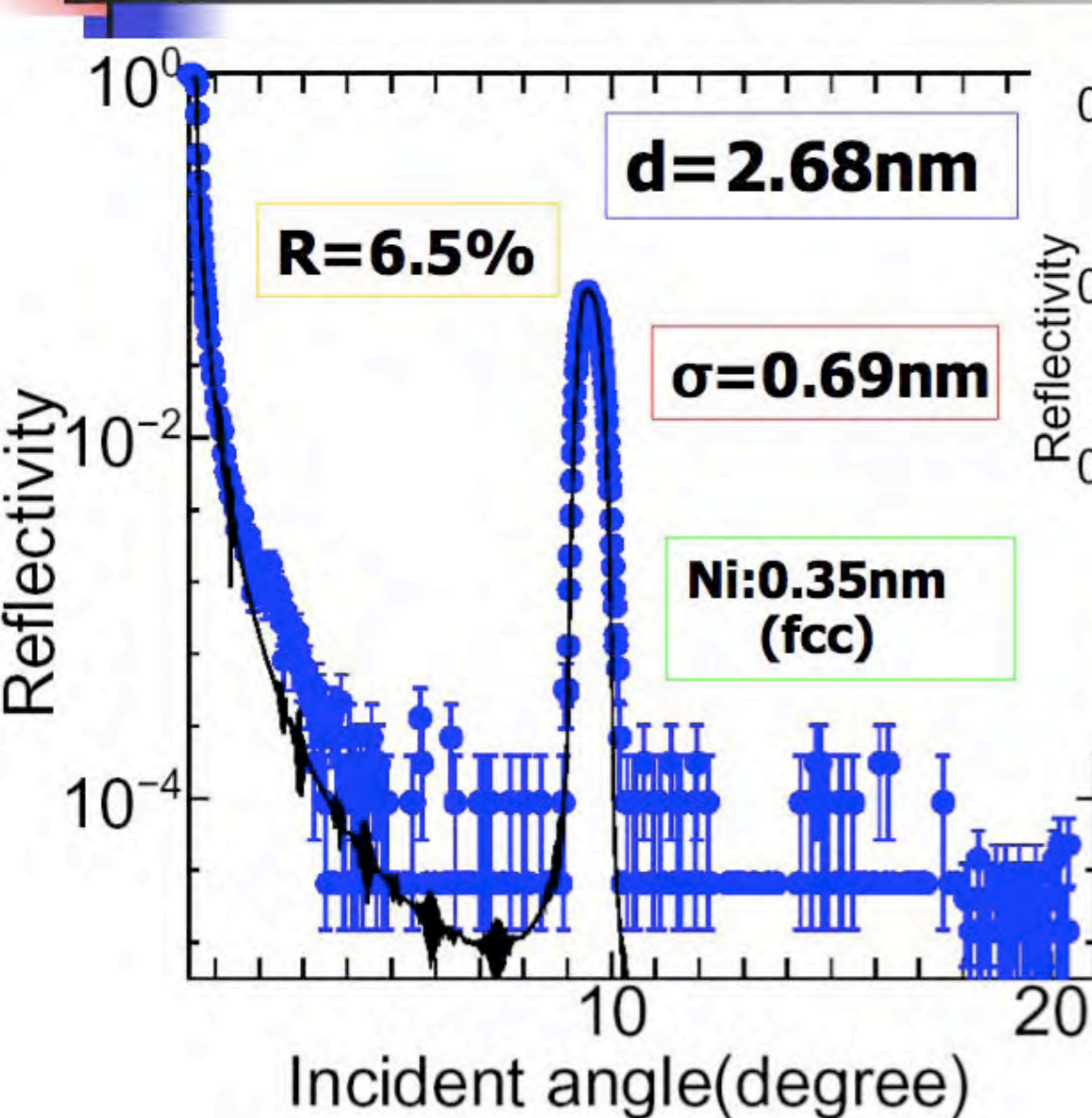
 $\sigma=0.55\text{nm}$ 

Independence from number of layers !

There is no growth of Ni crystal with increment of number of layers

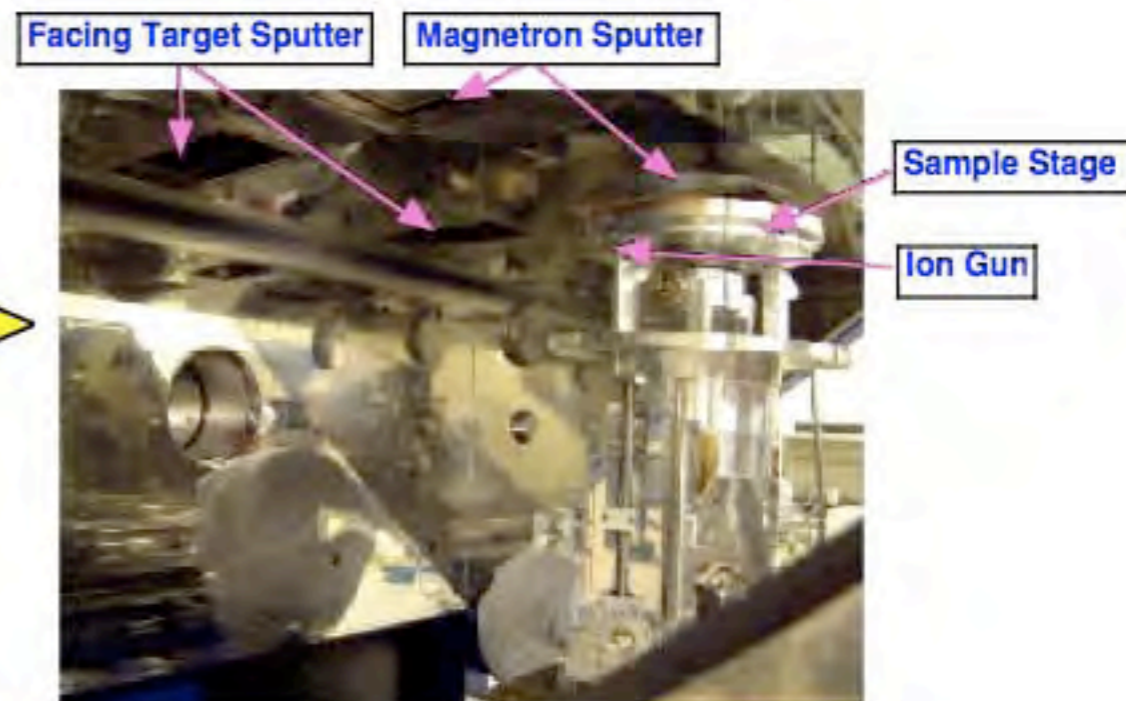
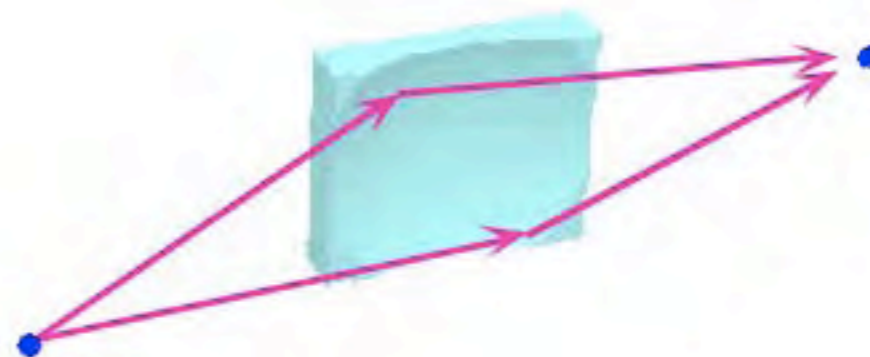
The increment of interface roughness is estimated to be less than 0.2nm

Trial for fabricating very thin d-spacing Ni/Ti multilayer (4285, 10000 layers)



We have succeed in controlling thickness accurately !

Flat/Curved Supermirror



Multilayer Fabrication Facility

- Facing-target Magnetron Sputter
- Ion Beam Polishing
- 6-axis Controlled Deposition
- Full Numerical Control
- Real-time Feedback

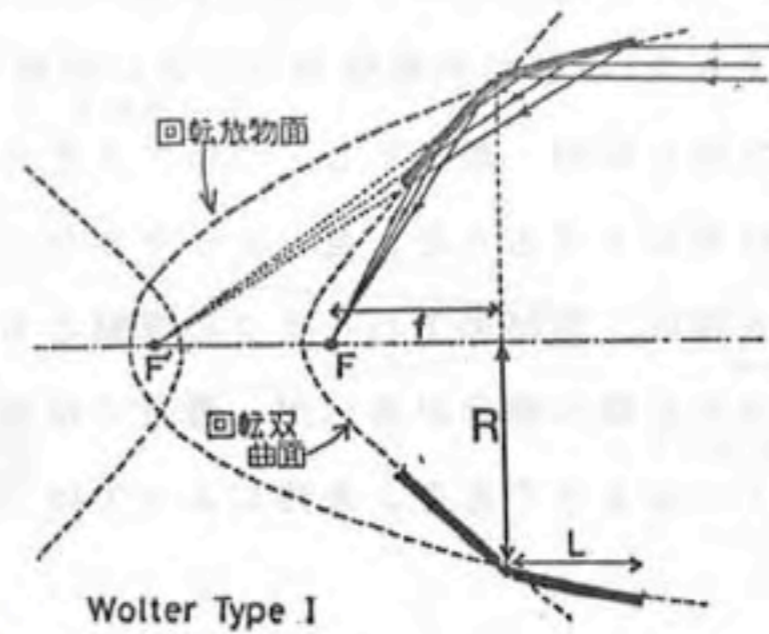
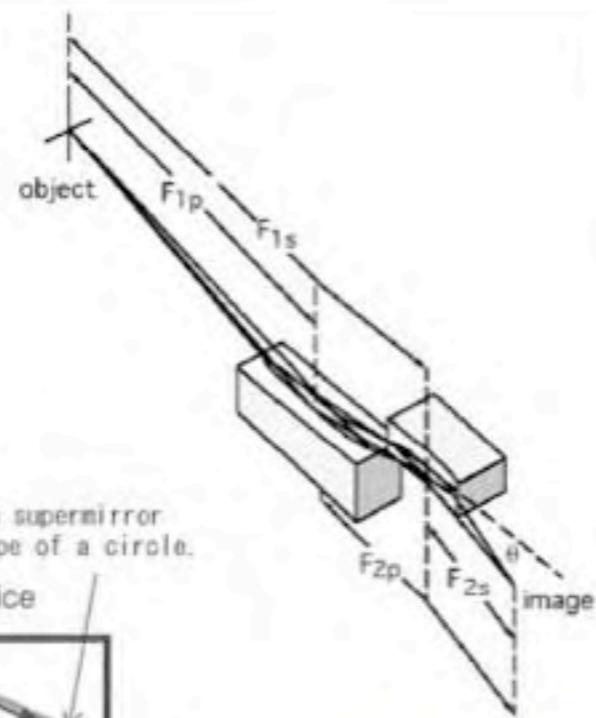


図12 Wolter I 型の X 線反射結像鏡

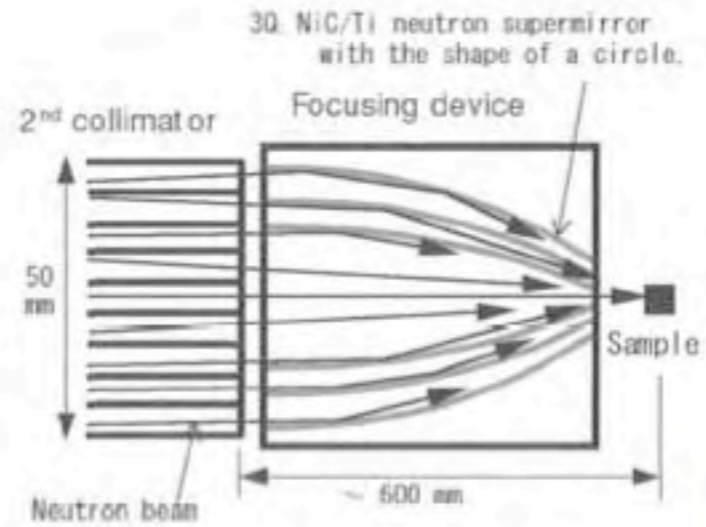
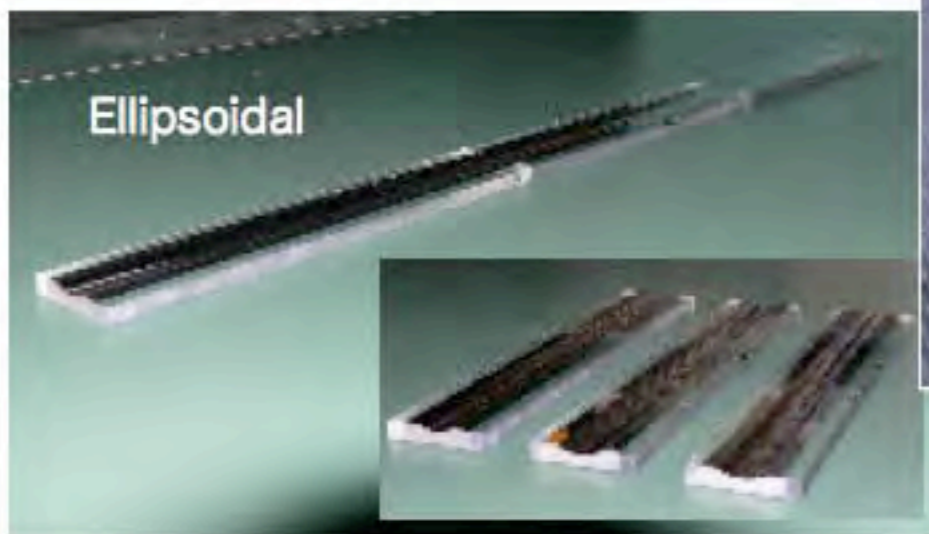
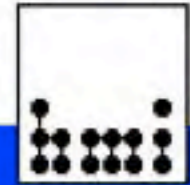


Figure 1. Schematic drawing of the neutron focusing device.

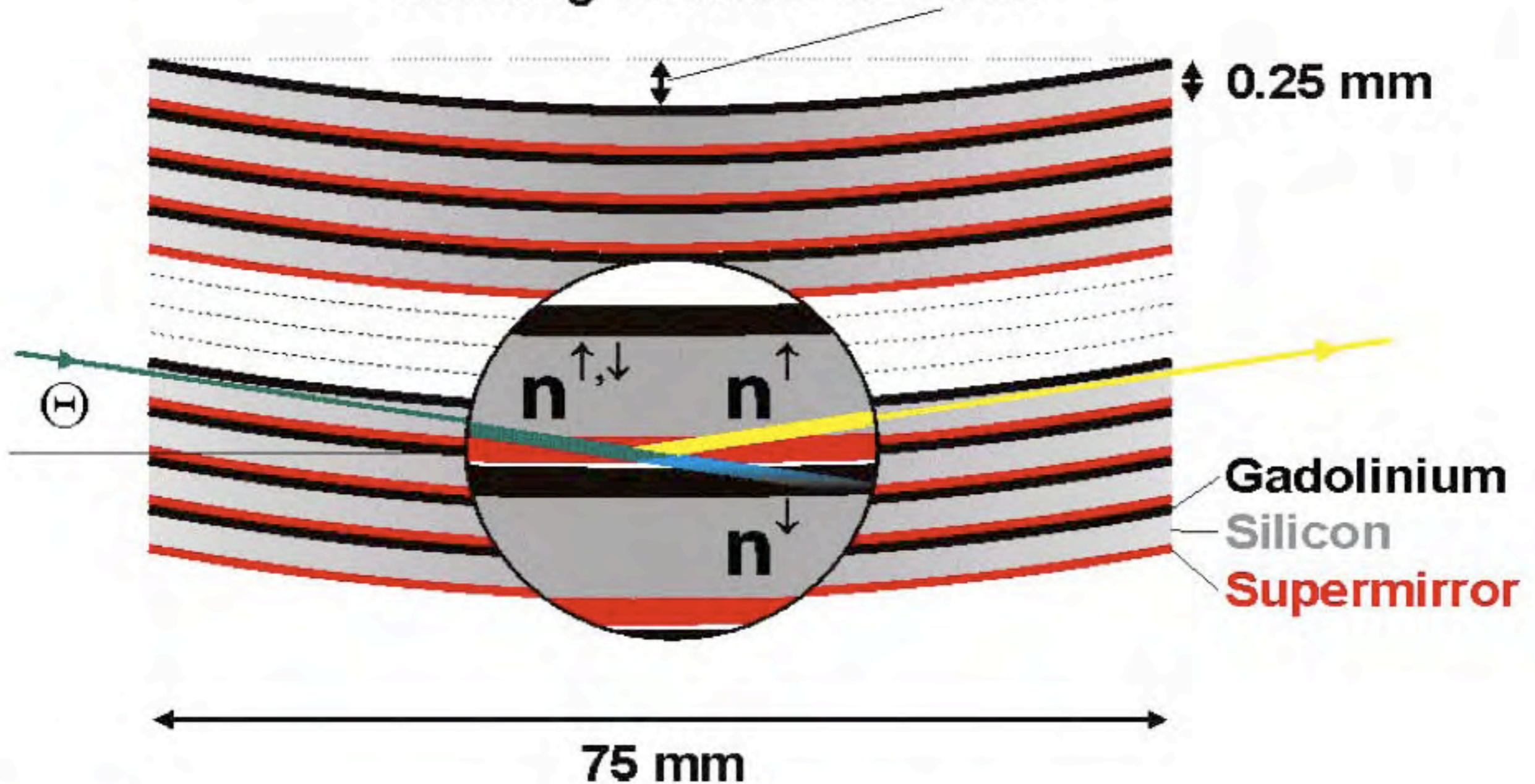


Solid state polarizing bender

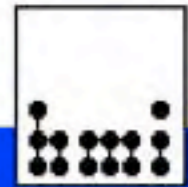


Hahn-Meitner-Institut
Berlin

Bending distance 0.25 mm

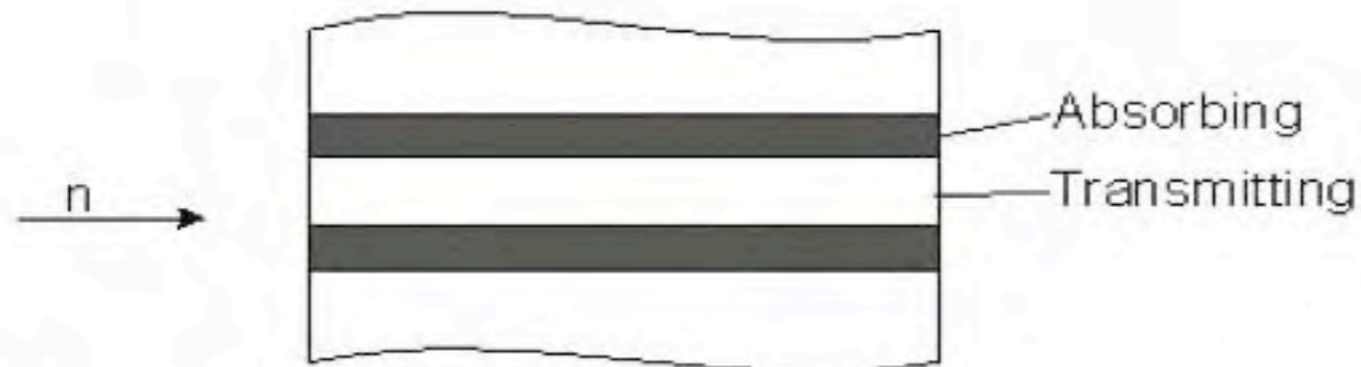


Solid state collimators

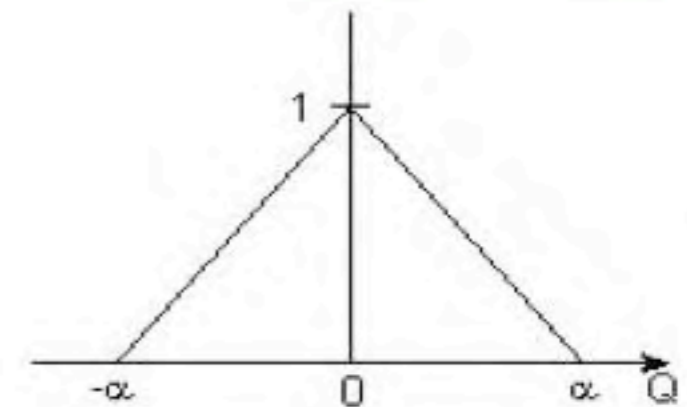


Hahn-Meitner-Institut
Berlin

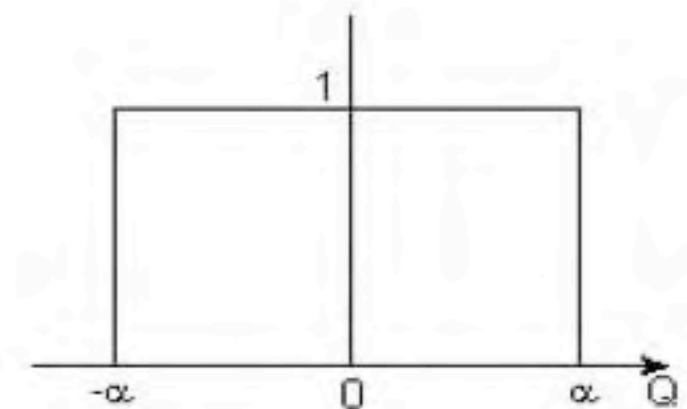
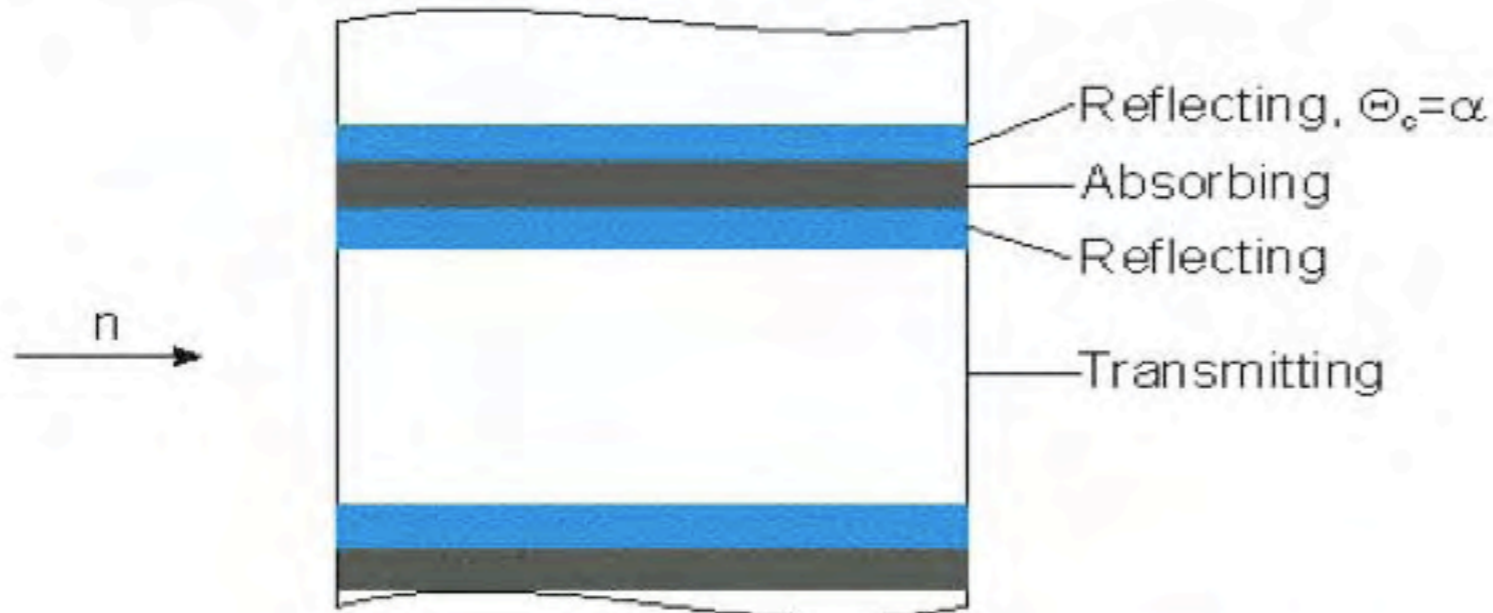
1. Only absorption



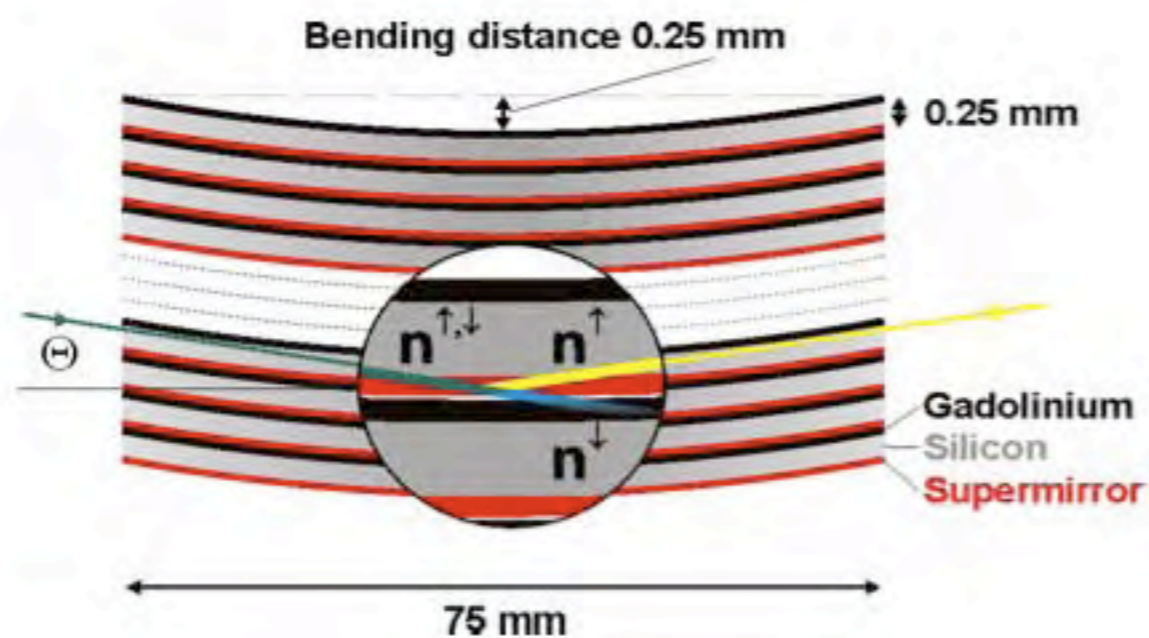
Transmission



2. Reflection and absorption



Compact Polarizer



1-1. 中性子光学基礎

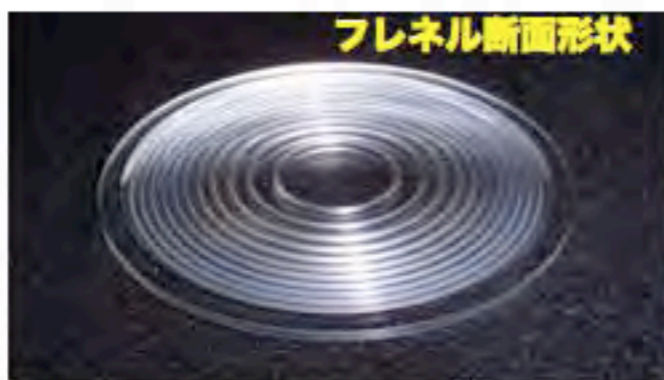
(16) 中性子物質界面屈折光学 (物質レンズ)

中性子物質界面屈折光学は、物質界面で中性子が屈折するという性質を利用する光学系です。小型で有効開口度の大きな光学系を構成できます。

両凹面物質レンズは、1990年代後半から実用的な冷中性子収束光学系として研究が進められました。2000年代に入ってから、レンズ素材による中性子の減衰を抑えるために、レンズを薄くする開発が進められました。最も薄いマイクロプリズムは、熱中性子を屈折で曲げる能力を持っています。



両凹面型



フレネル断面形状



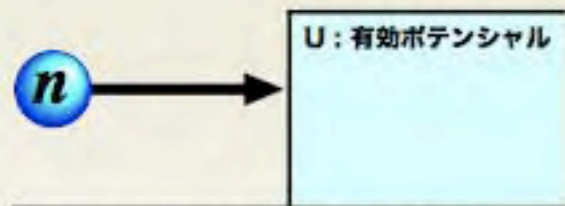
同心円二重



マイクロプリズム

中性子の屈折

中性子は、物質に侵入する時に、“有効ポテンシャル”を乗り越える必要があります。界面で屈折されます。“有効ポテンシャル”の値は100eVのオーダーですから、熱中性子や冷中性子の持つ運動エネルギーに比べれば大変小さな値です。したがって、屈折すると言っても、ごく小さな角度変化にとどまります。



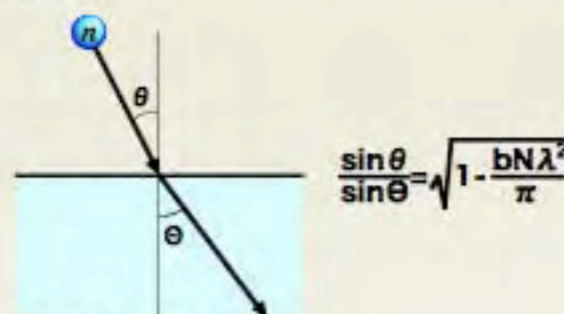
“有効ポテンシャル”は、原子核ポテンシャルを体積平均したもので、次式で与えられる。

$$U = \frac{2\pi\hbar^2}{m_n} bN$$

m_n : 中性子質量
 b : 散乱長
 N : 原子核数密度

単一界面での屈折角

図のように物質界面に対して角度 θ で入射した場合、屈折角 θ' との関係は次の通りです。



$$\frac{\sin\theta}{\sin\theta'} = \sqrt{1 - \frac{bN\lambda^2}{\pi}}$$

中性子の屈折率は、次の式で与えられます。

$$n - 1 = -\frac{\lambda^2}{2\pi} bN$$

大半の元素では $b > 0$ なので、可視光用の凹レンズ形状のレンズが中性子を集光します。屈折率の値は、エックス線に対する屈折率とはほぼ同程度です。 $n - 1$ が負になるのもエックス線と同じです。

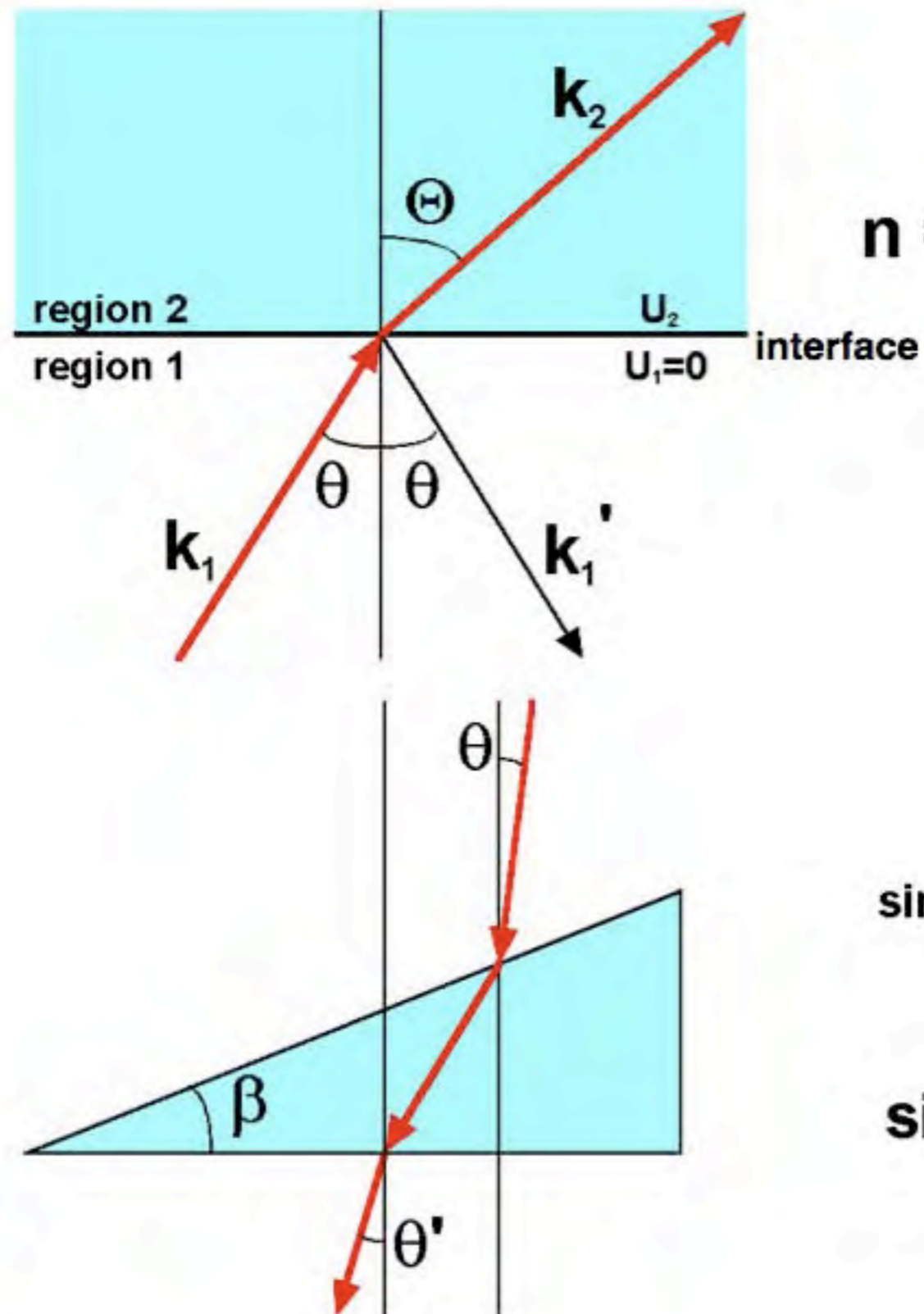
レンズの素材

中性子は、レンズ素材を通過する間に、散乱及び吸収を受けます。散乱の中でも小角散乱は屈折現象と競合します。使用する中性子の波長領域に応じて、散乱が小さな物質を素材に選ぶ必要があります。中性子の吸収は、素材に含まれる原子核の種類で決まりますので、素材は中性子吸収が少ない元素を選ぶ必要があります。よって、束縛散乱長 b の虚部が大きく、虚部が小さく、なおかつ小角散乱が小さいという条件をすべて満たしたものが、中性子物質レンズとして使用できます。

	Re b [fm]	Im b [zm]
H	-3.741	92
He	3.07	2.0
Li	-1.95	1960
Be	7.778	2.1
B	5.34	210
C	6.6484	0.97
N	9.6	528
O	5.805	0.053
F	5.654	2.7
Ne	4.57	11



Neutron Refraction on an Interface



$$n = \frac{\sin \theta}{\sin \Theta} = \sqrt{1 - \frac{bN\lambda^2}{\pi}} \sim 1 - \frac{bN\lambda^2}{2\pi}$$

b : bound coherent scattering length
 N : number density of nuclei
 λ : neutron wavelength

$$\sin \theta' = \sin(\theta + \beta) \cos \theta - \sqrt{\cos^2(\theta + \beta) - \frac{bN\lambda^2}{\pi}} \sin \beta$$

$$\sin \theta' - \sin \theta \sim \frac{\phi_c^2}{2} \frac{\sin \theta}{\cos(\theta + \beta)}$$

Refraction of Neutrons and X-rays

Neutrons

$$n-1 = -\frac{\lambda^2}{2\pi} bN$$

	Re b [fm]	Im b [zm]
H	-3.741	92
He	3.07	2.0
Li	-1.95	1960
Be	7.778	2.1
B	5.34	210
C	6.6484	0.97
N	9.6	528
O	5.805	0.053
F	5.654	2.7
Ne	4.57	11

X-rays

$$n-1 = -\frac{\lambda^2}{2\pi} r_e fN$$

$$r_e = 2.817 \text{ fm}$$

$$f = f_1 + if_2$$

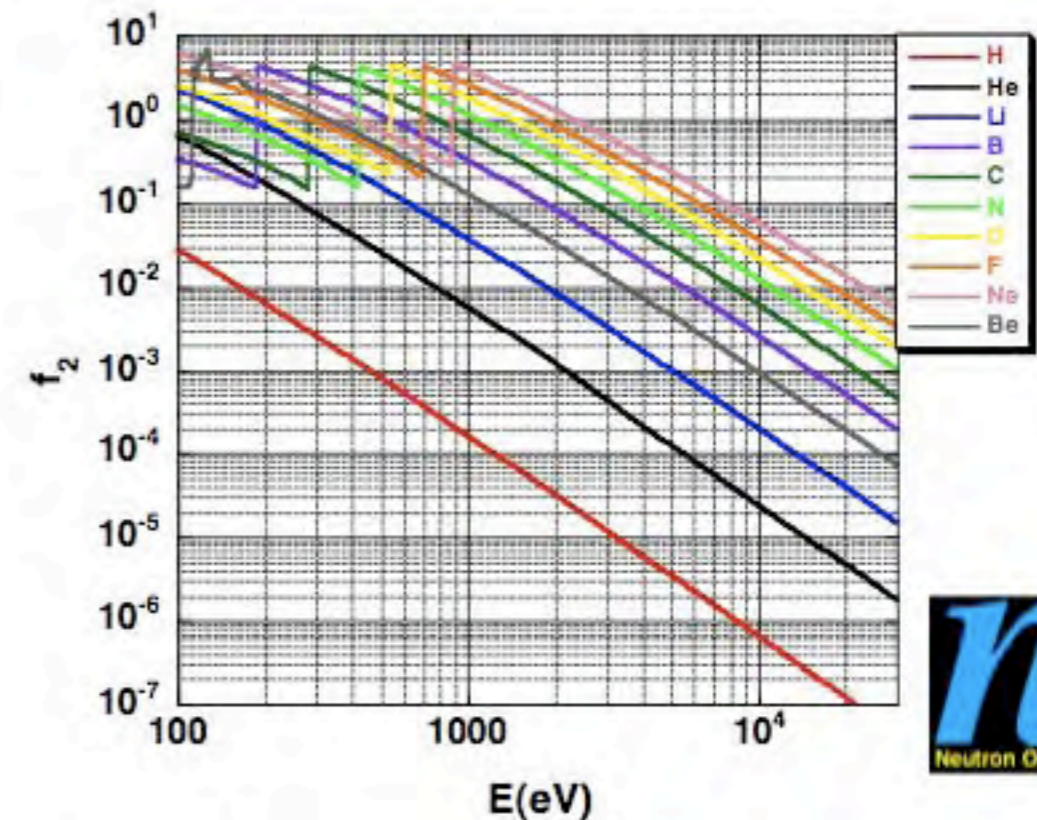
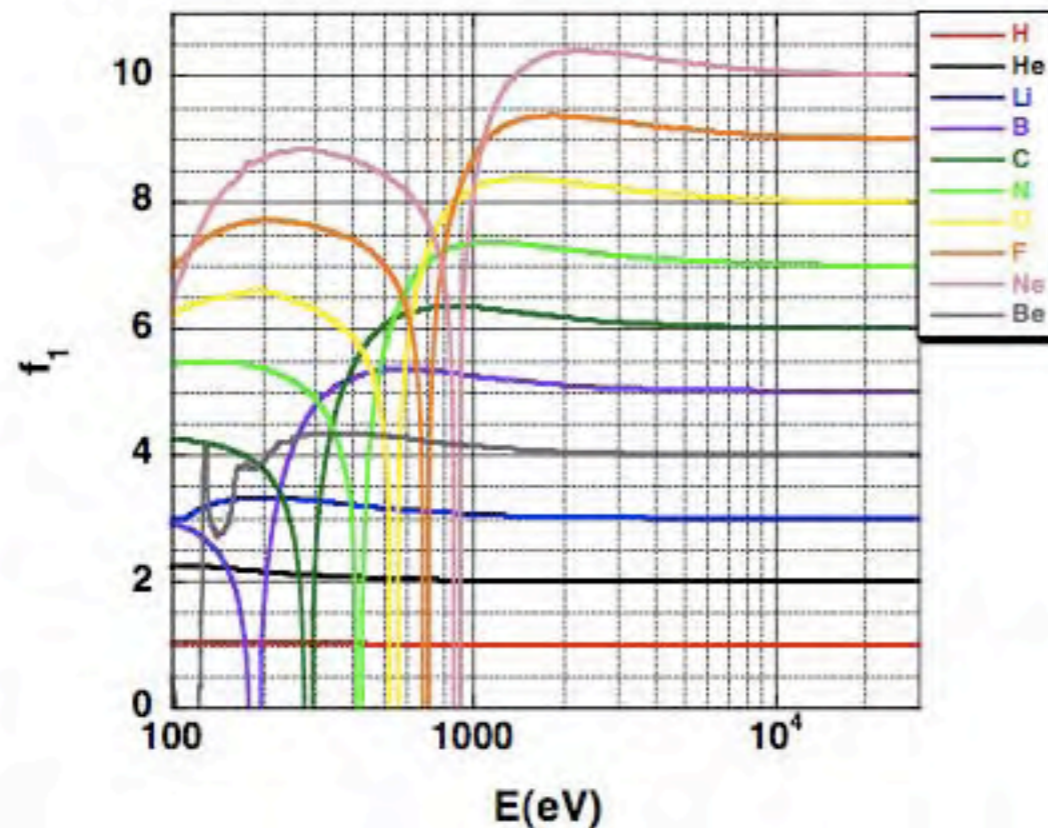


Figure-of-Merit of Elements

	V [neV]	W [neV]	 V/W ×10⁻⁶
O	0.08	7.41×10⁻¹⁰	109.864
C	194.19	2.87×10⁻⁵	6.833
Be	247.60	6.78×10⁻⁵	3.681
F	0.08	3.75×10⁻⁸	2.119
He	0.02	1.44×10⁻⁸	1.501
Bi	62.34	6.93×10⁻⁵	0.907
Ne	0.03	7.61×10⁻⁸	0.422
Mg	60.01	1.97×10⁻⁴	0.307
Pb	80.22	4.09×10⁻⁴	0.198
Zr	78.13	5.79×10⁻⁴	0.136
P	47.26	4.44×10⁻⁴	0.107
Si	53.90	6.23×10⁻⁴	0.087
Rb	19.79	2.98×10⁻⁴	0.067
Al	53.61	1.01×10⁻³	0.054
Ca	29.36	7.22×10⁻⁴	0.041
H	-0.05	1.30×10⁻⁶	0.040

refracting power

$$U = V + iW$$

attenuation power

Figure-of-Merit of Compounds

		V [neV]	W [neV]	$ V/W \times 10^{-6}$
O_2	oxygen	0.0808	7.41×10^{-10}	109.86
D_2O	heavy water	166	2.95×10^{-6}	56.09
D_2	deuterium	0.0927	2.00×10^{-9}	46.24
$C_2D_2O_4$	d-acetic acid	94.5	4.64×10^{-6}	20.38
C_6D_{14}	d-hexane	-	-	16.96
CO_2	dry ice	101	5.98×10^{-6}	16.92
CD_2	d-PE	200	1.26×10^{-5}	15.85
C_6D_6	d-benzene	-	-	11.92
C_6D_5F	d-fluorobenzene	-	-	8.55
C	carbon	194	2.84×10^{-5}	6.83
BeO	beryllium	255	4.06×10^{-5}	6.27
$C_6F_4O_2$	benzoquinone	-	-	4.46
Be	beryllium	249	6.76×10^{-5}	3.68
CF_2	PTFE	112	3.94×10^{-5}	2.85
Bi_2O_3	bismuth	103	5.64×10^{-5}	1.82
MgF_2	magnesium fluoride	131	1.80×10^{-4}	0.73
CO_3Pb	lead carbonate	-	-	0.69
MgO	magnesium oxide	158	2.48×10^{-4}	0.64
PbO_2	lead oxide			0.44
SiO_2	quartz	102	3.09×10^{-4}	0.33
SiO_2	vitreous silica	90.1	2.72×10^{-4}	0.33
PbO	lead oxide	101	3.16×10^{-4}	0.32
BeO_4S	beryllium sulfate	86	3.73×10^{-4}	0.23
Al_2O_3	alumina	148	7.85×10^{-4}	0.19
C_3Al_4	alum. carbide	69.3	6.62×10^{-4}	0.10
BeN_2O_6	beryllium nitrate	86.2	1.49×10^{-3}	0.06
H_2O	water	-64.1	1.60×10^{-3}	0.04
NiO	nickel oxide	234	1.81×10^{-2}	0.01
CH_2	PE	-8.34	1.86×10^{-3}	0.00
$C_3Nd_2O_9$	neod cbnt hydrt	-	-	0.00

refracting power

$$U = V + iW$$

attenuation power

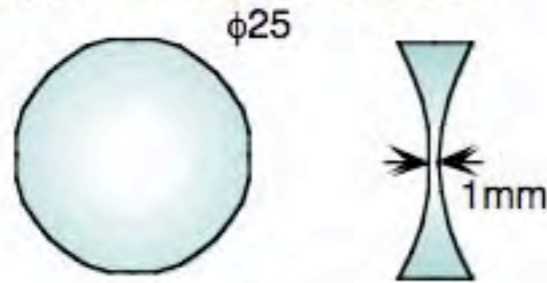
Lens Material

large refracting power

small attenuation

weak small angle scattering

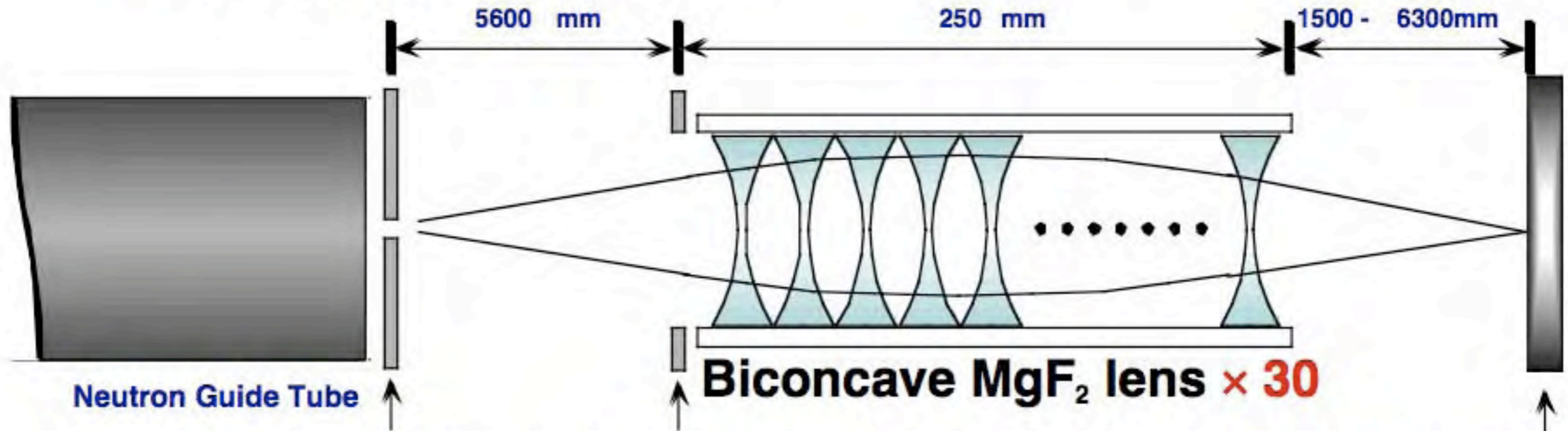
Compound Refractive Lens



MgF₂ $n-1 = -8.9 \times 10^{-5} (\lambda=10\text{\AA})$

Lens diameter : 25 mm
 Curvature radius : 25 mm
 Center thickness : 1 mm
 focal length for 30 lenses : 3300 mm @ $\lambda=14.1\text{\AA}$

Biconcave MgF₂ lens

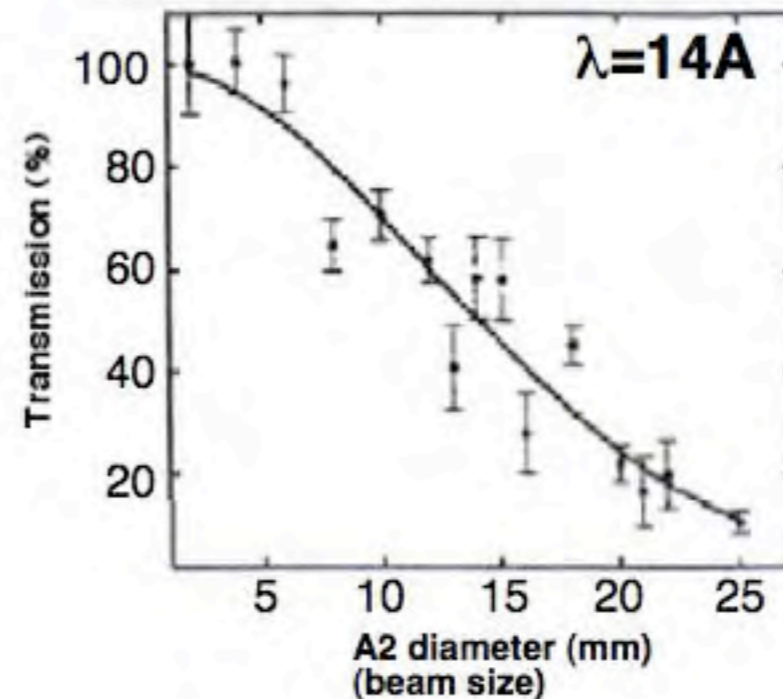
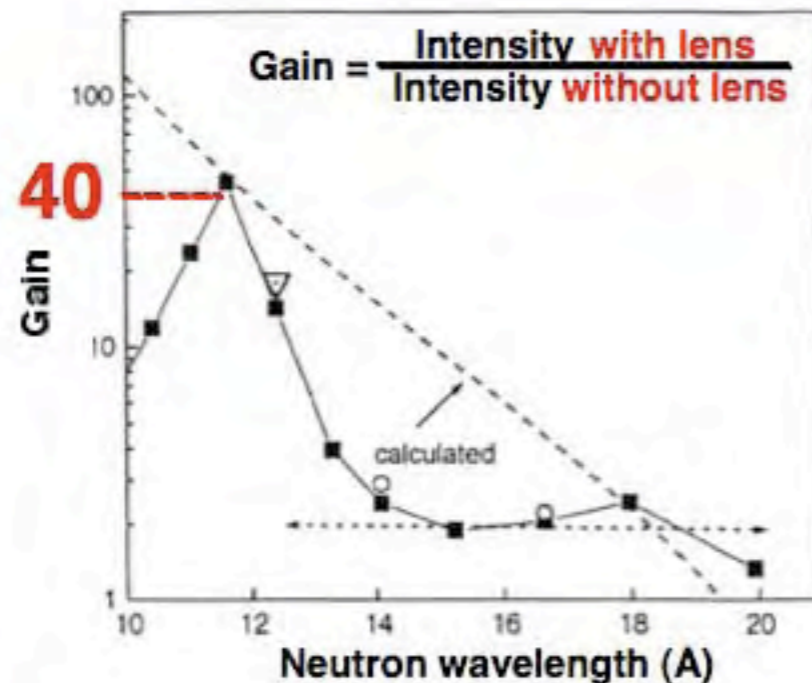


Neutron Guide Tube

A1 : 2mm-pinhole

A2 : 25mm-aperture

Area Detector (128x128)
 pixel size : 5x5mm²

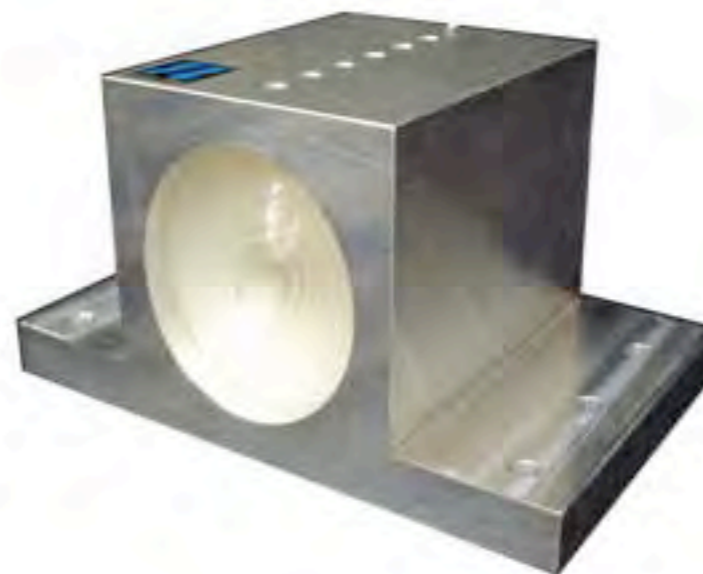


Fresnel-shape Lens

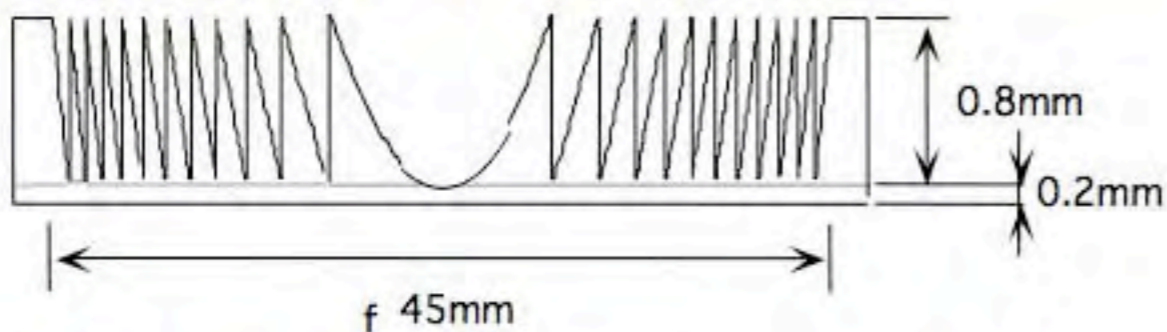
Lens Element



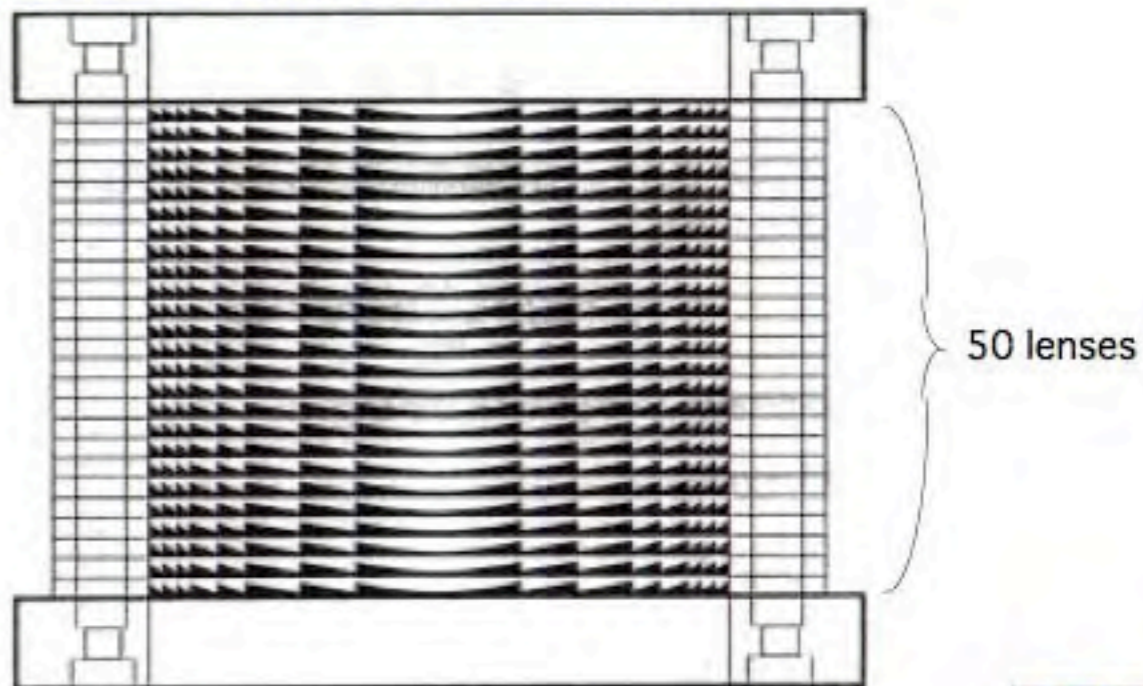
Assembled Set



Cross-section of a lens element



Cross-section of the assembled set



Material : MgF_2

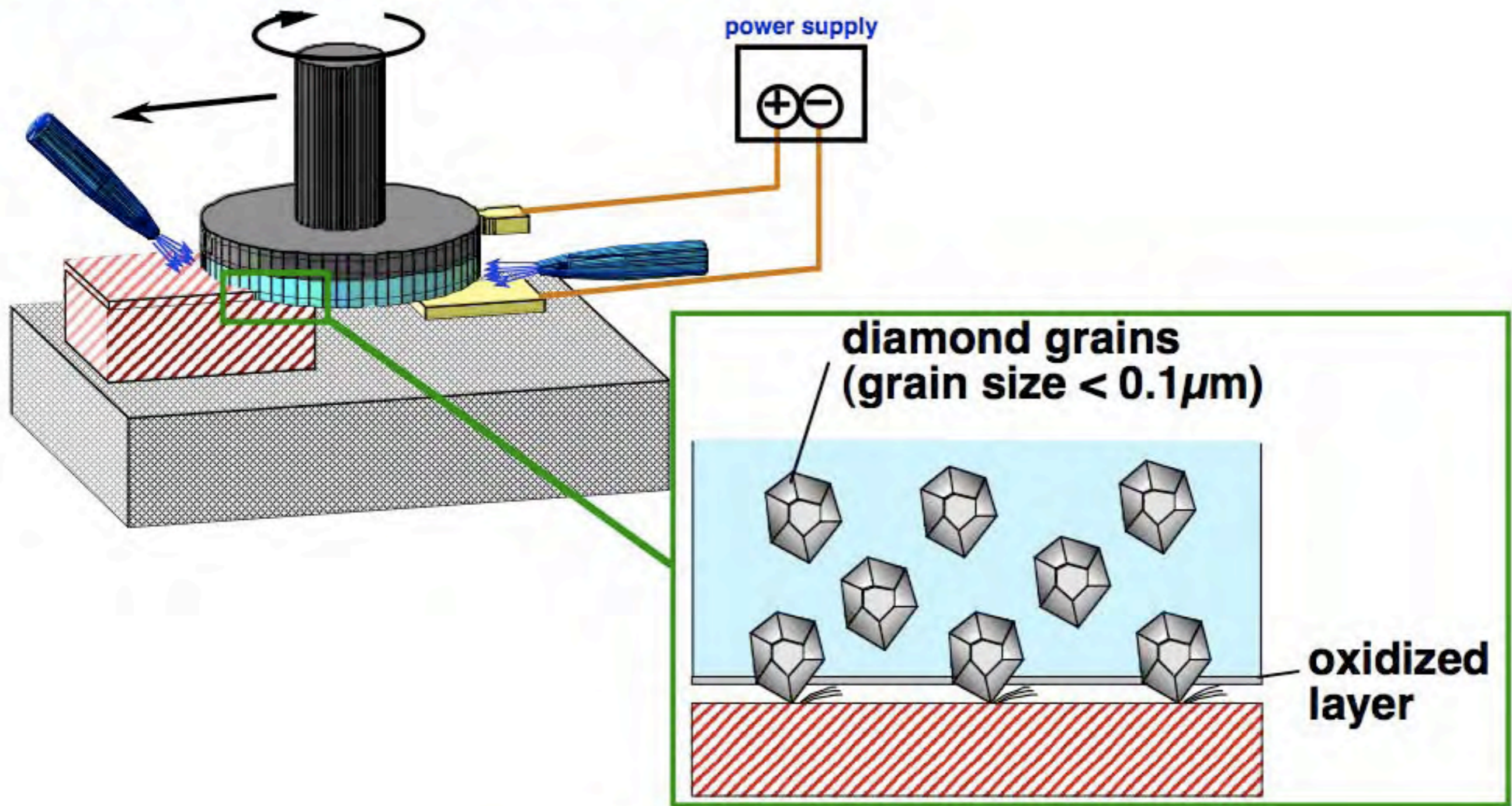
Effective potential : $U=(131-1.8 \times 10^{-4}i) \text{ neV}$

50 element stack

Focal length (at 10\AA) : 6.4m

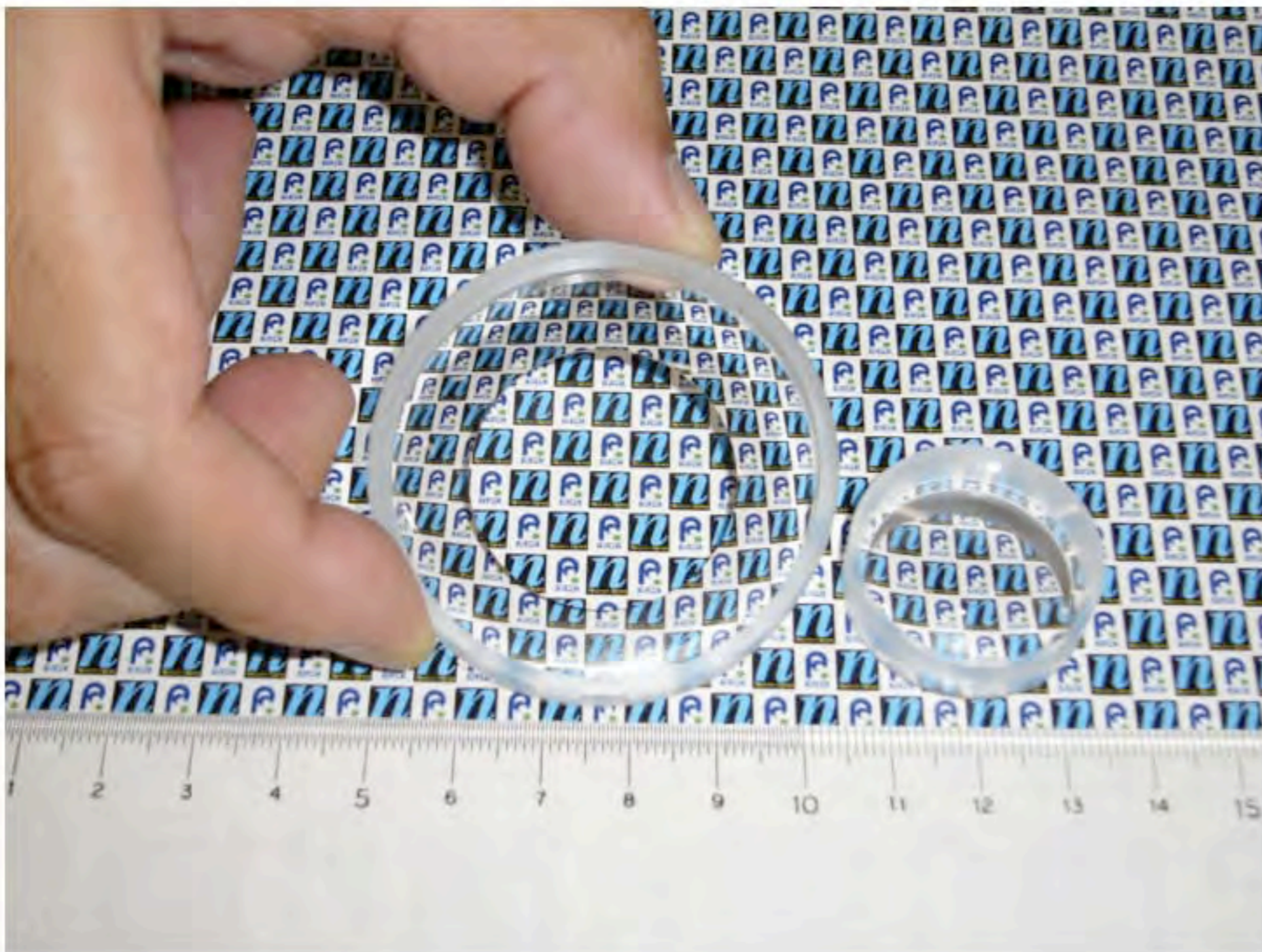
ELID Grinding Technique

ELectrolytic In-process Dressing

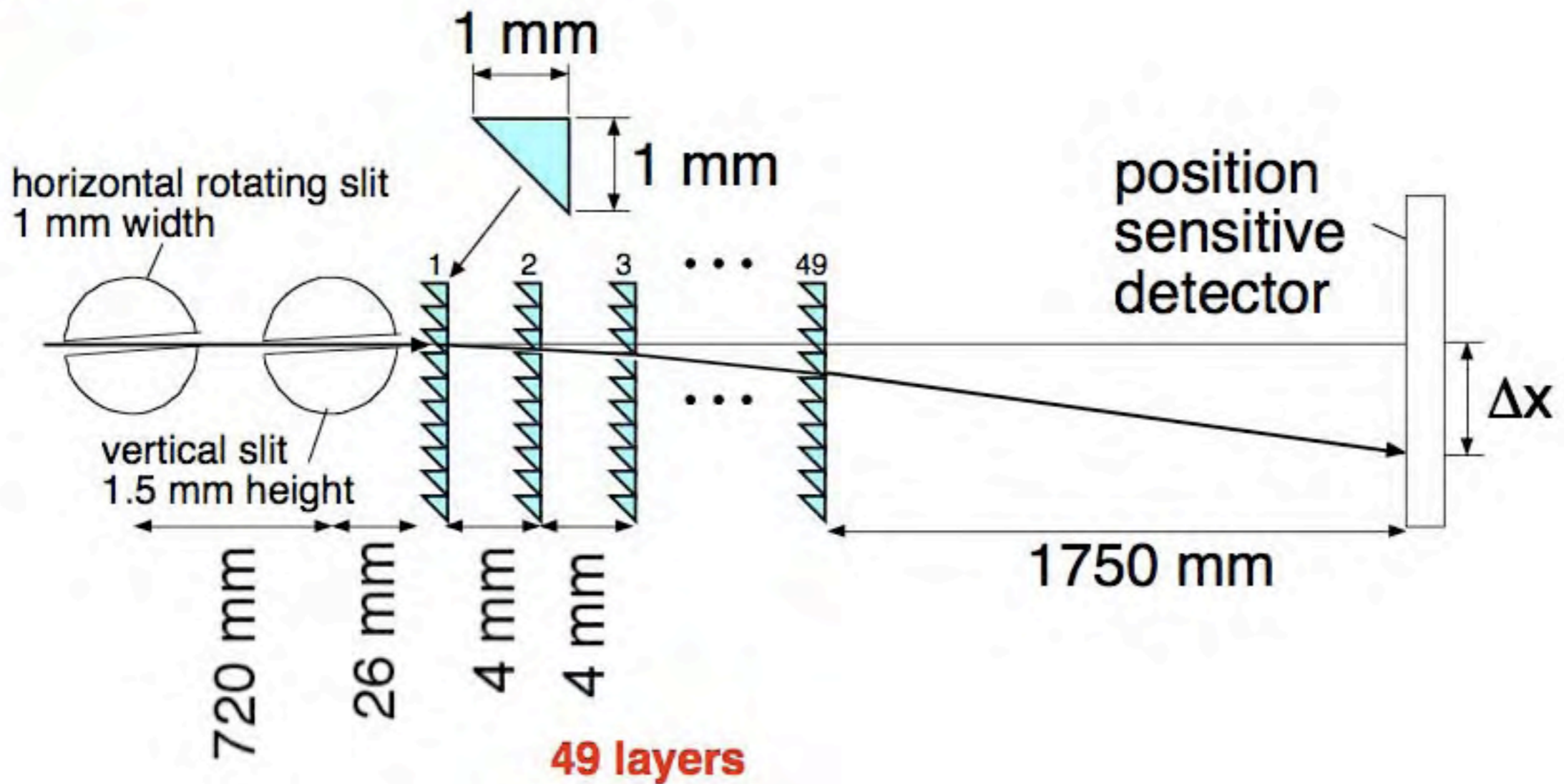


achievable surface roughness = 2~4A

Coaxial Double Biconcave



Prism



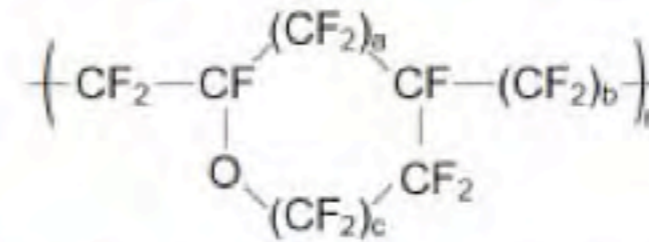
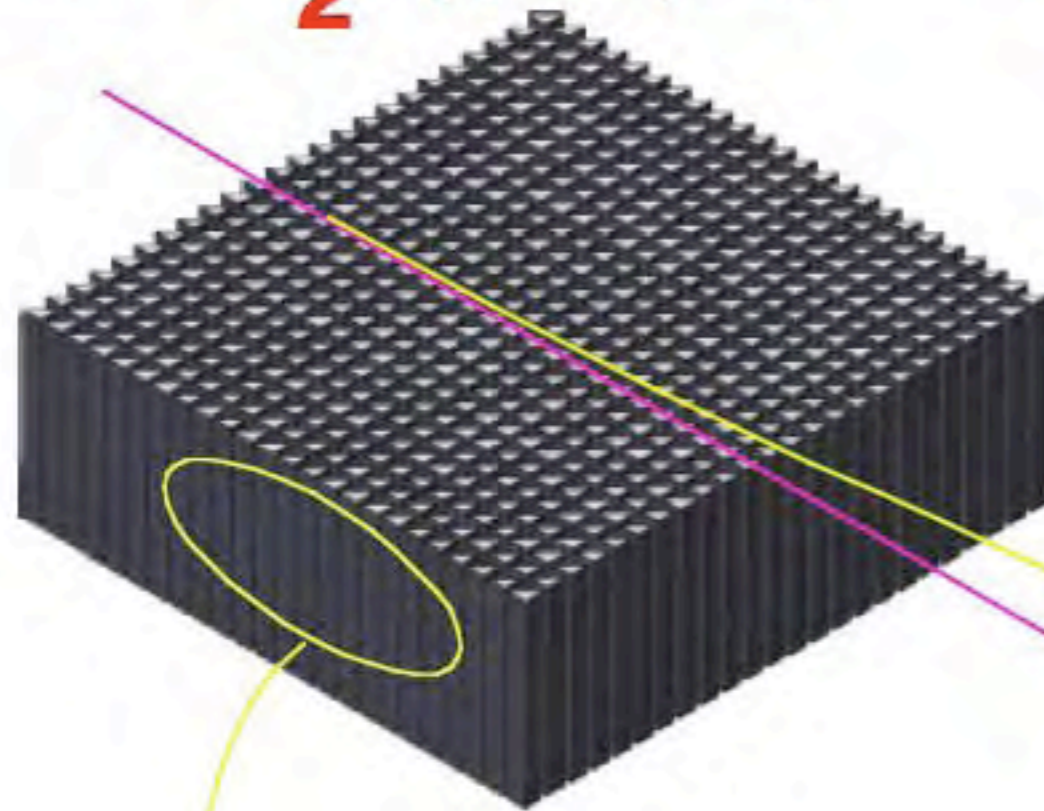
MgF₂ single crystal
 $U = (131 - 0.00018i)$ neV
design value of refraction angle = 4 mrad at 10A

Microprism

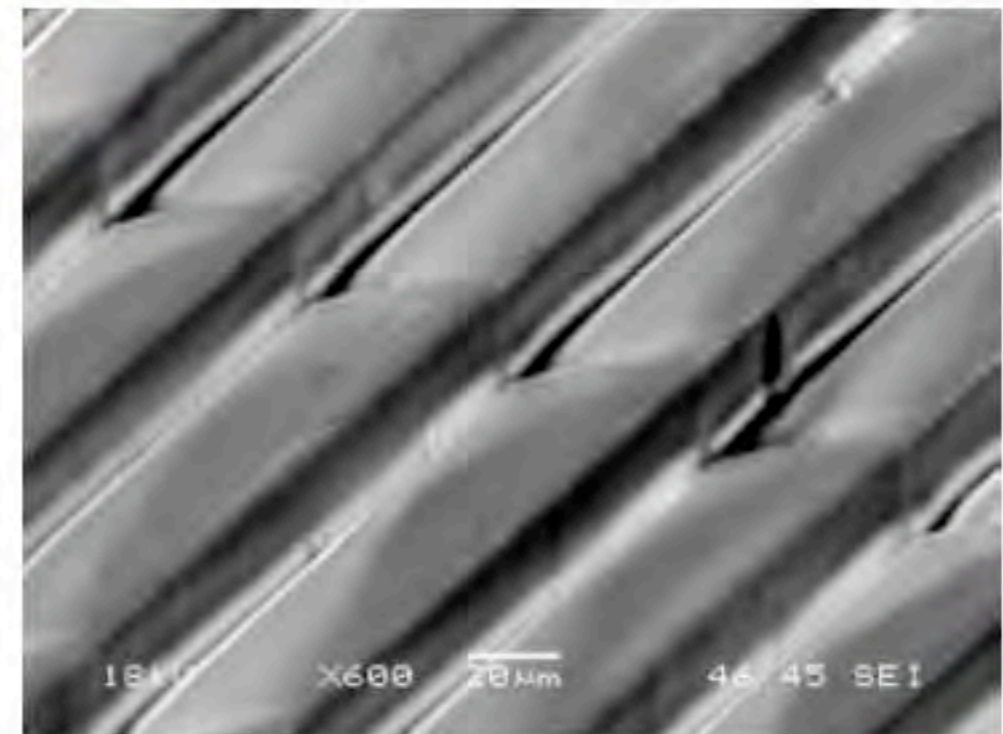
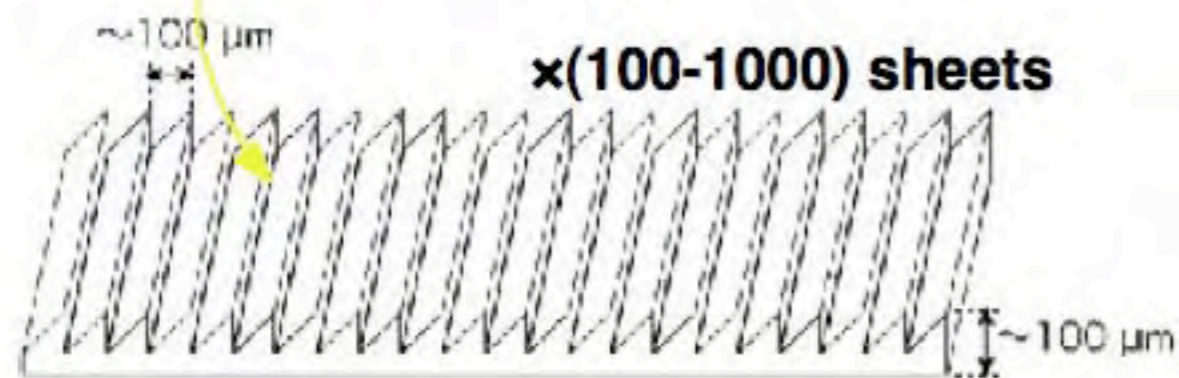
to expand applicable wavelength region of compound refractive optics

refraction angle of individual prisms

$$\Delta\theta \sim \frac{1}{2} (\phi_c/\lambda)^2 \lambda^2 = \lambda^2 \times 7.2 \times 10^{-7} \text{ rad}$$

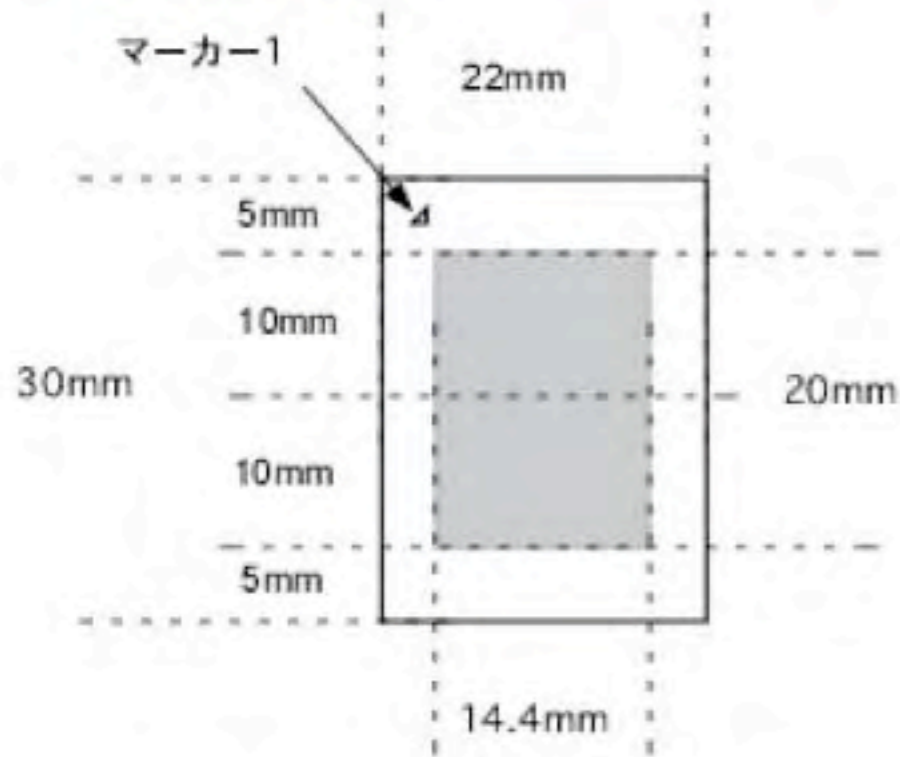


CYTOP: $\phi_c/\lambda = 1.2 \times 10^{-3} \text{ rad/\AA}$

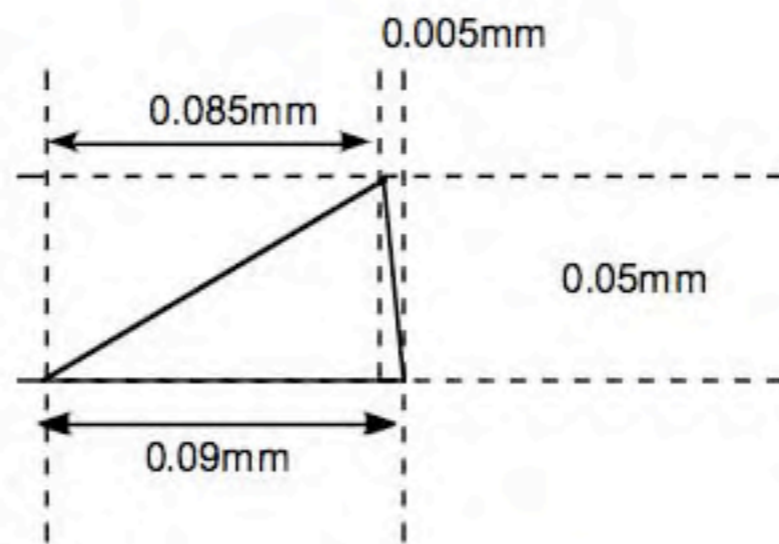


レーザー加工によるMicroprismの型の製作

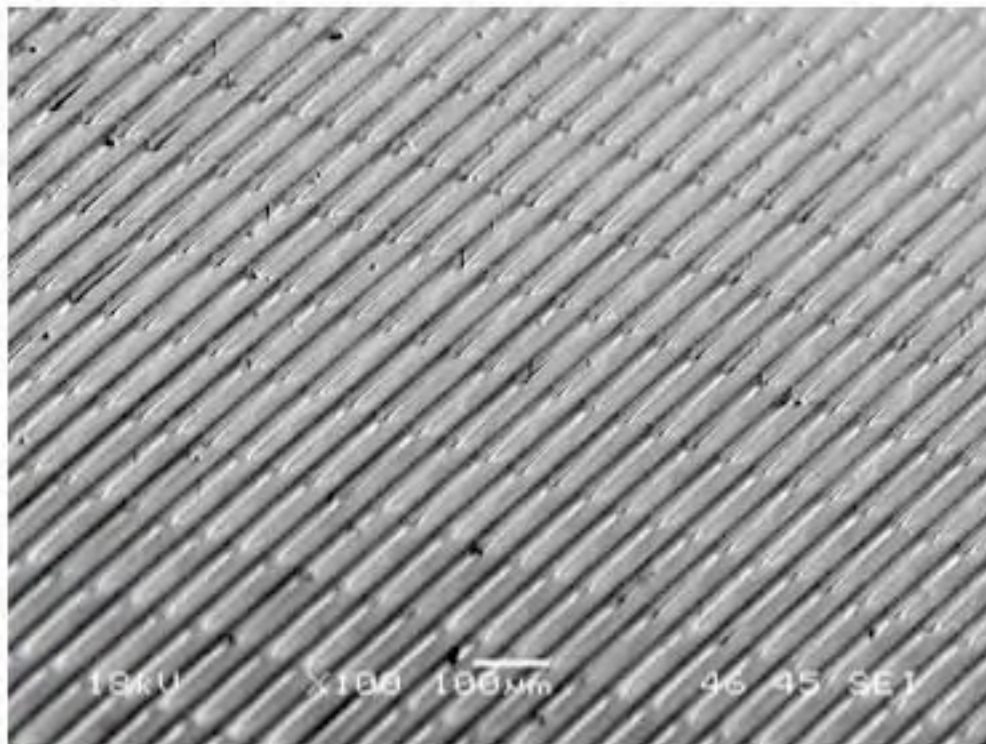
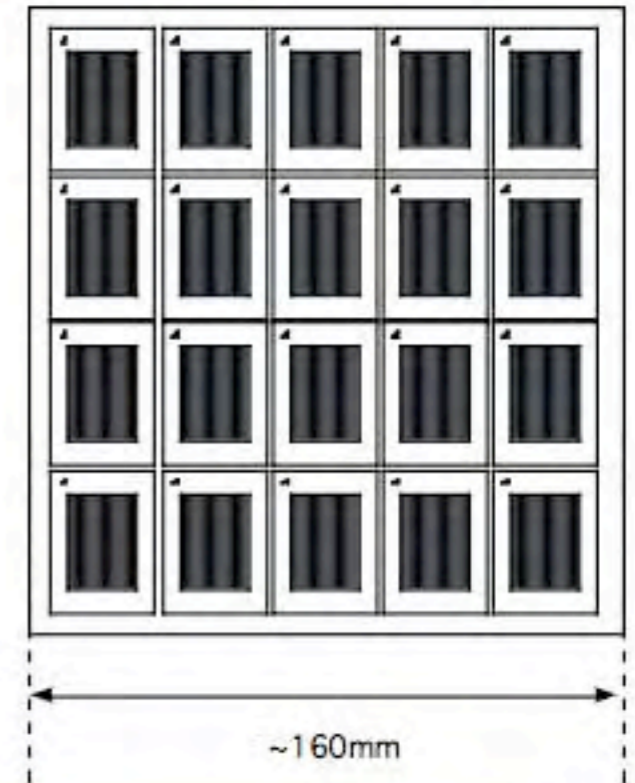
基本形状



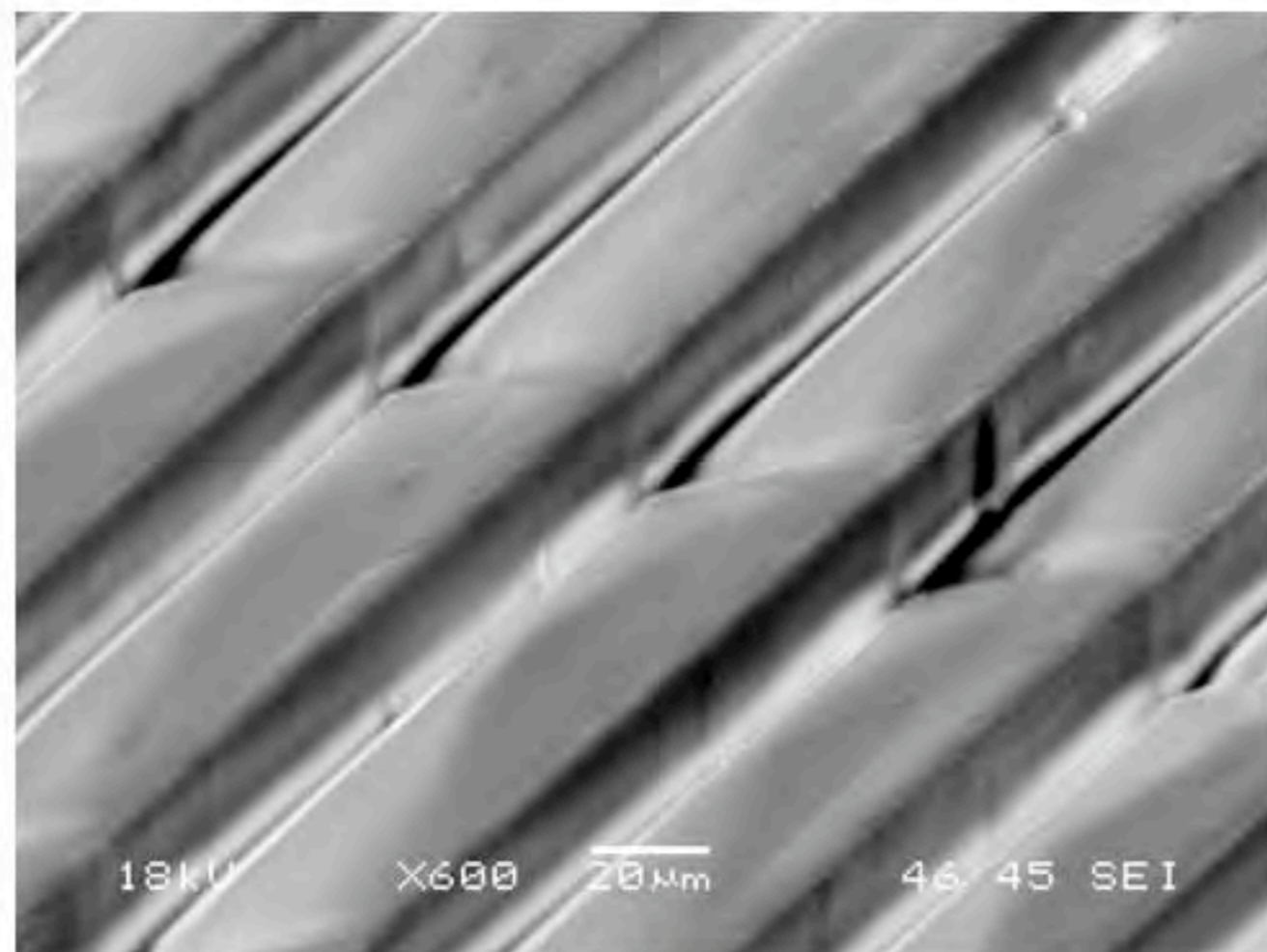
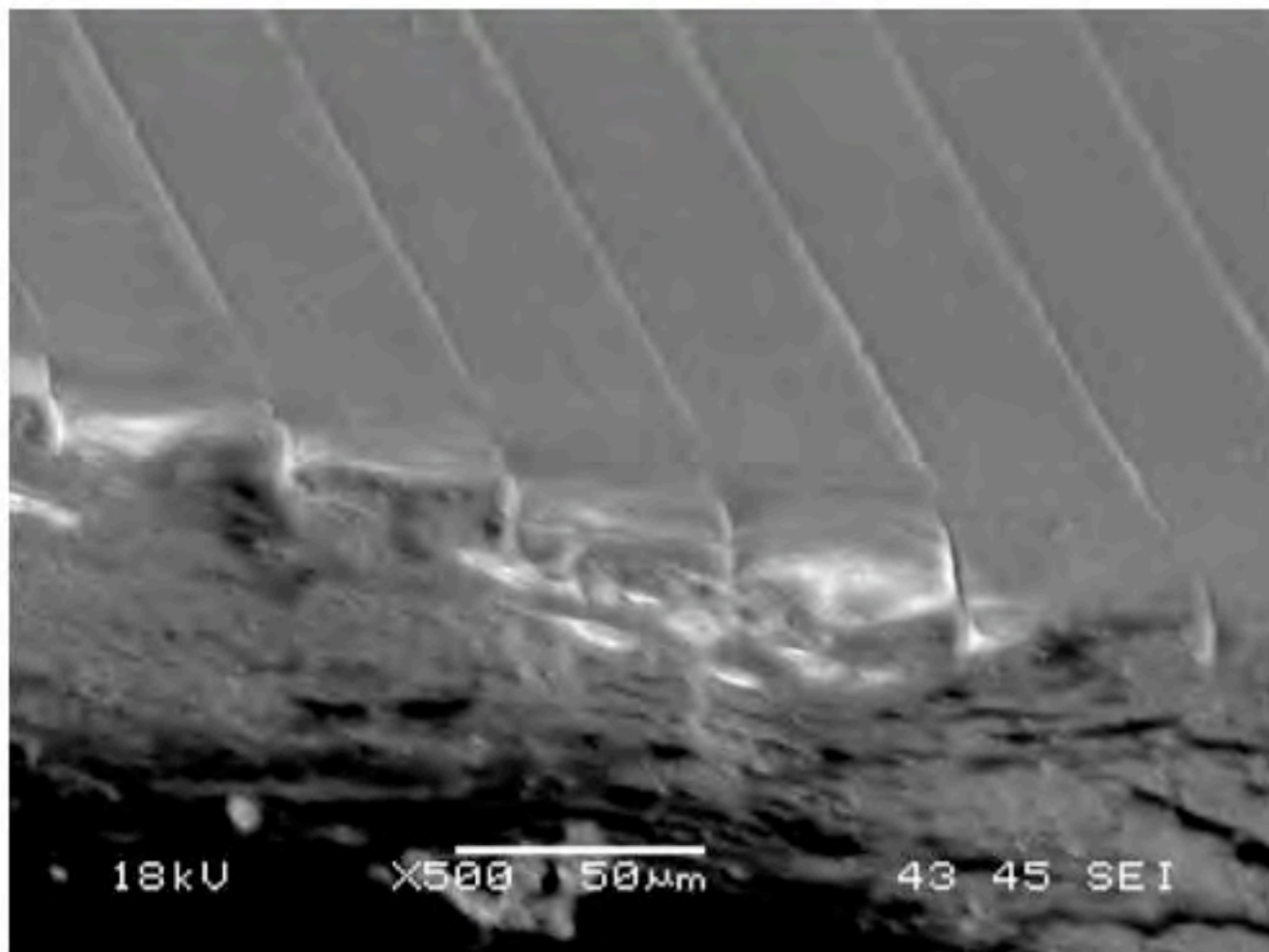
溝の断面



シートパターン



形状の精度



深さ方向 $\pm 2\mu\text{m}$ 段差 $\pm 0.5\mu\text{m}$ エッジの先端 $R < 2\mu\text{m}$

期待される屈折角 (wavelength=1.5Å)

1000sheets	0.95mrad	75%
2000sheets	1.90mrad	56%
3000sheets	2.85mrad	28%

Microprism



proprietary of RIKEN

CYTOP 100 μ m-pitch

レンズに適する条件

選択の基準

1. $\text{Re } U$ が大きい ($\text{Re } b$ が大きい順 : Dy, Gd, Hg, Pm, ...)
2. $\text{Im } U$ が小さい ($\text{Im } b$ が小さい順 : O, D, C, He, Be, F, ...)
($\text{Re } b / \text{Im } b \propto ((\sigma_{\text{sca}})^{1/2} / \sigma_{\text{abs}})$ が大きい)

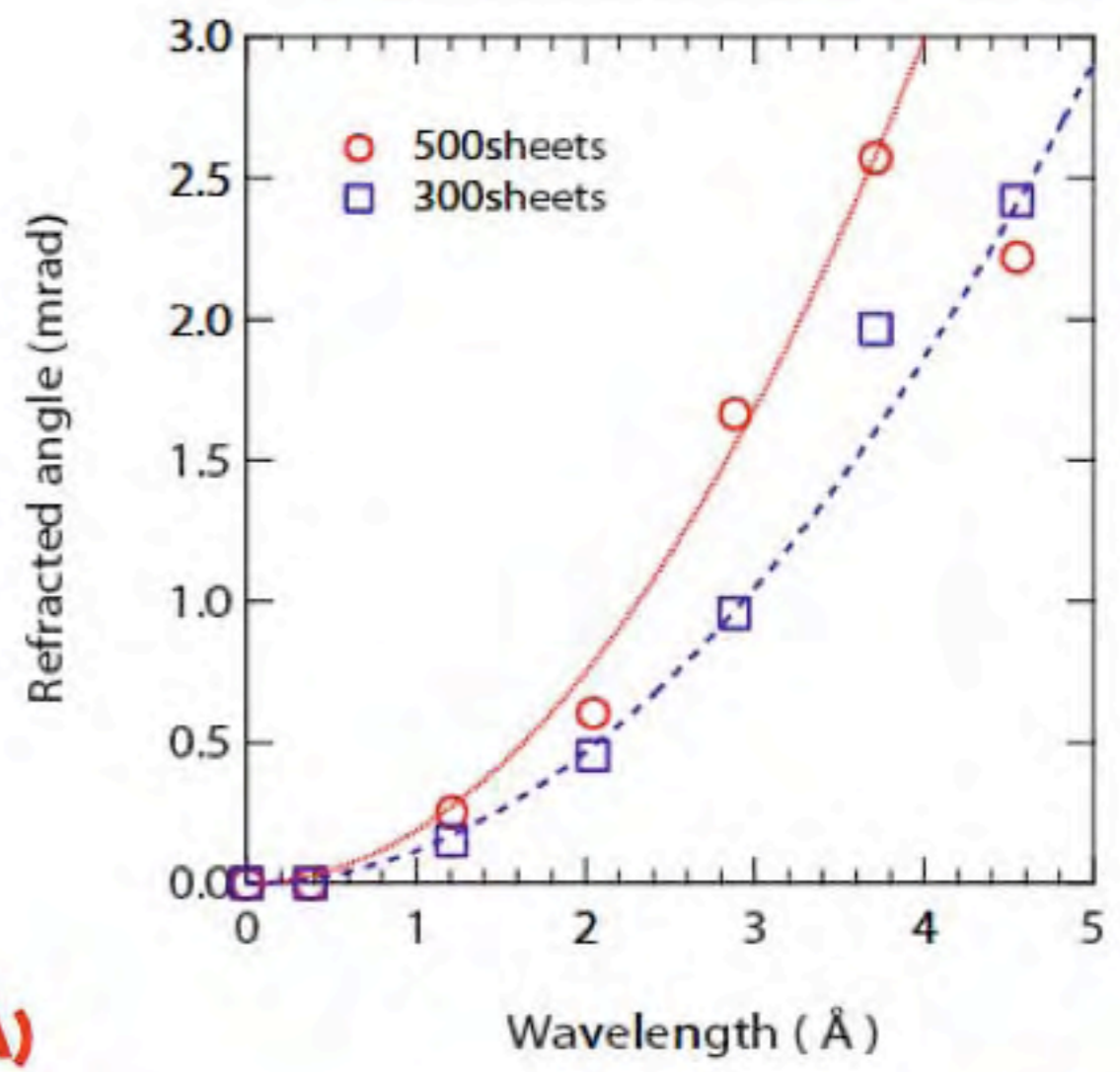
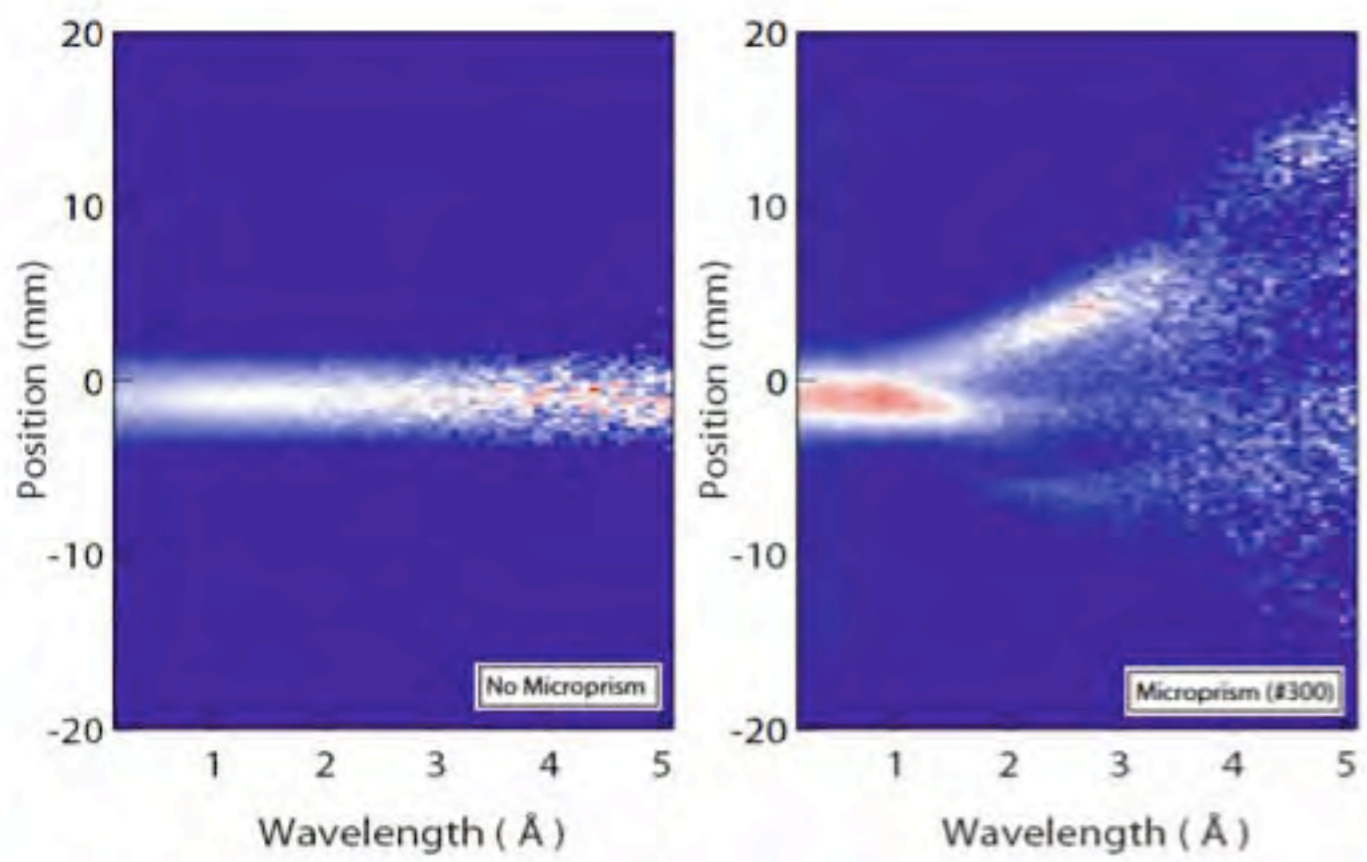
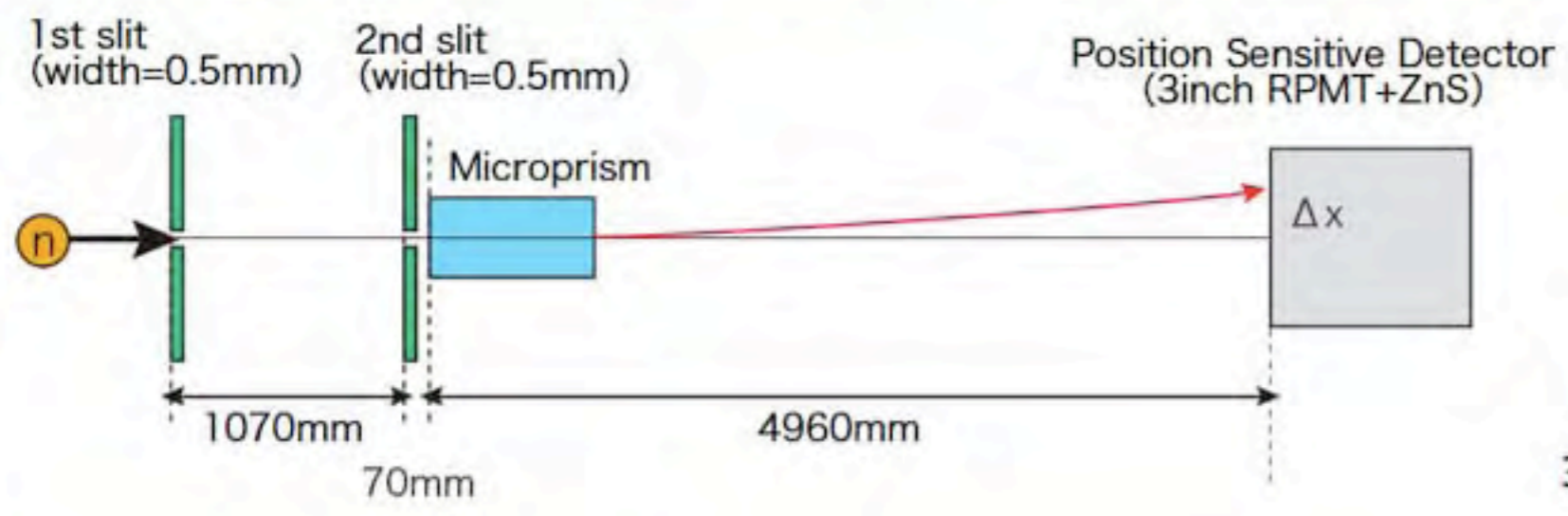
O, D, C, Be, F, He, Bi, Ne, Mg, Pb, Zr, P, Si,
Rb, Al, Ca, H, Sn, Na, Ce, Nb, Y, Sr, S, Zn,
N, Ba, Fe, Ge, U, Ar, Ru, Tl, Mo, Ga, Ni,
Cu, K, As, Cr, Te, Sb, Br, La, ...

3. 小角散乱が少ない
4. 細工が大量にできること

(例) フッ素系樹脂 : 型から転写できる

Microprism

to expand applicable wavelength region of compound refractive optics



refraction observed up to $E=0.1\text{ eV}$ ($\lambda=1\text{ \AA}$)



Comparison of Bending Power and Aperture for Parallel Cold Neutrons

Superconducting Sextupole
 $G=12800\text{Tm}^{-2}$ 46mm diameter



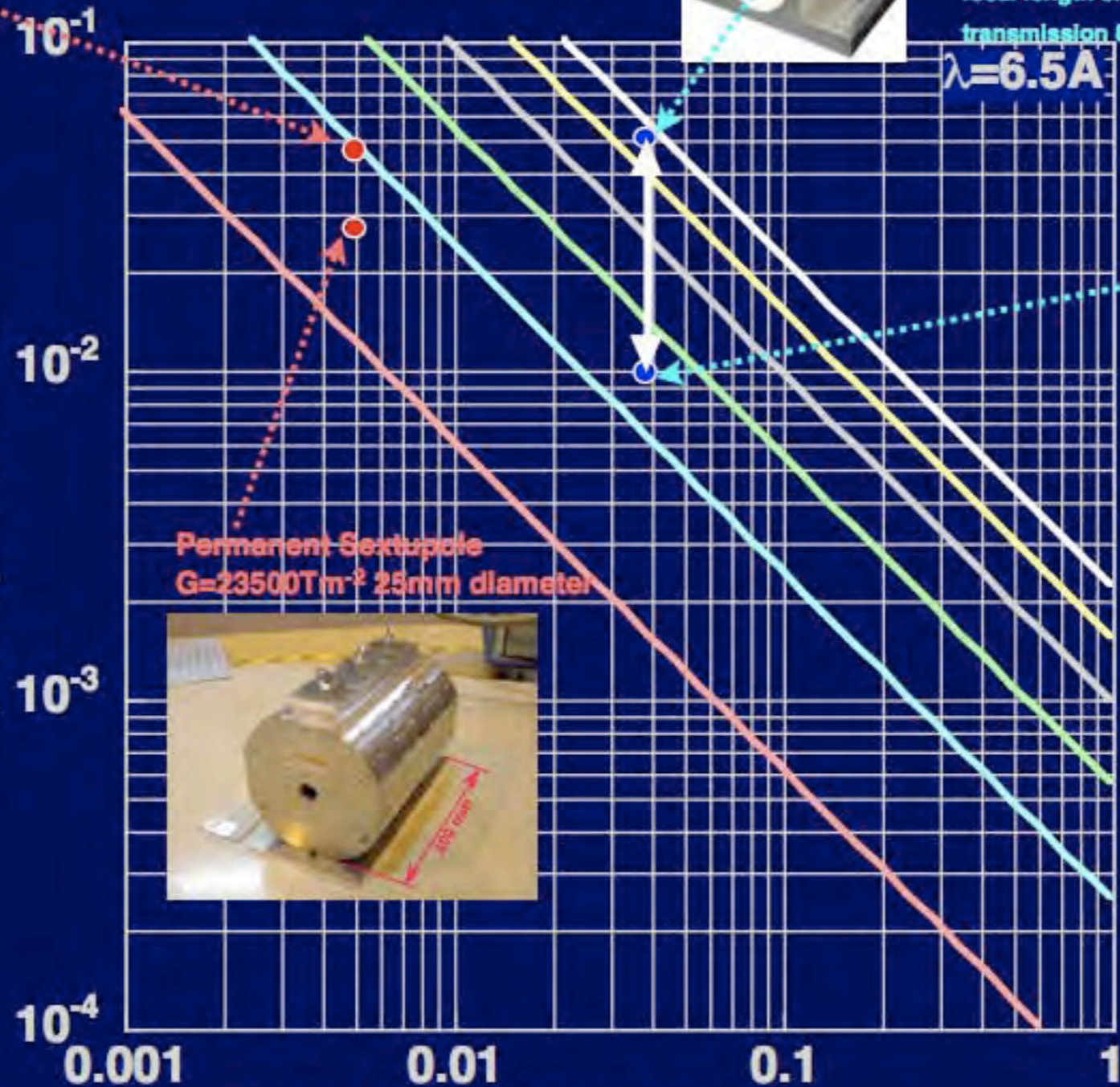
Fresnel Shape MgF_2
 aperture: 50mm (20mm)
 thickness: 1mm (per piece)
 50 piece-stack for $\lambda=11.4\text{\AA}$
 focal length 5m
 transmission 82.9%



Prism MgF_2
 area: 10mm x 50mm
 thickness: 1mm (per piece)
 50 layer-stack for $\lambda=11.4\text{\AA}$
 refraction angle: 4.3mrad
 (8mrad $\lambda=15.5\text{\AA}$)
 transmission 80%

→ Large Acceptance

x_c or aperture [m]



Permanent Sextupole
 $G=23500\text{Tm}^{-2}$ 25mm diameter



- 6Q_c supermirror
- 5Q_c supermirror
- 4Q_c supermirror
- 3Q_c supermirror
- 2Q_c supermirror
- Ni mirror (1Q_c)

Curvature P [rad m^{-1}] → Strong Bending Power



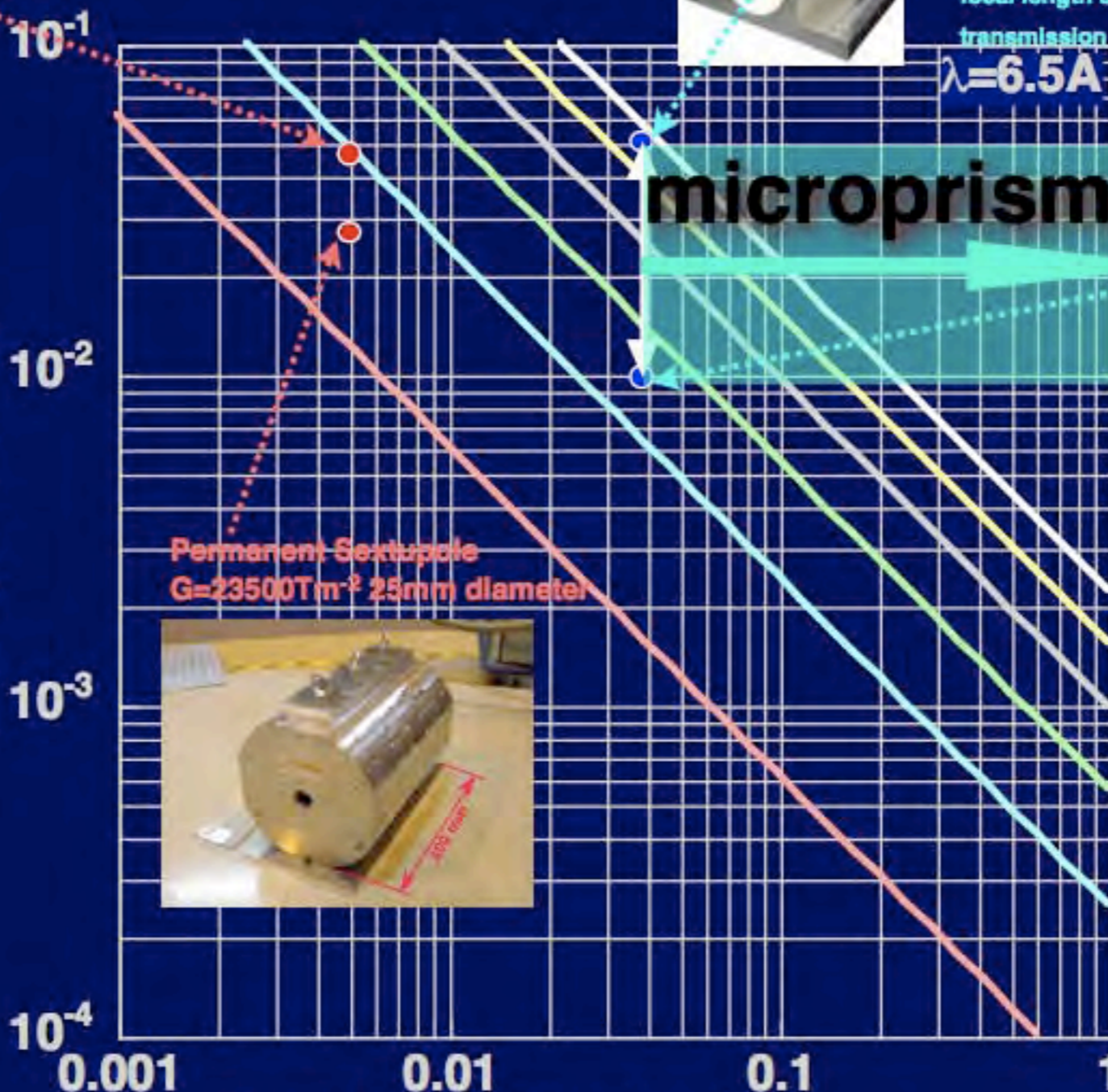
Comparison of Bending Power and Aperture for Parallel Cold Neutrons

Superconducting Sextupole
 $G=12800\text{Tm}^{-2}$ 46mm diameter



→ Large Acceptance

x_c or aperture [m]



Permanent Sextupole
 $G=23500\text{Tm}^{-2}$ 25mm diameter



Fresnel Shape MgF₂
 aperture: 50mm (20mm)
 thickness: 1mm (per piece)
 50 piece-stack for $\lambda=11.4\text{\AA}$
 focal length 5m
 transmission 82.9%



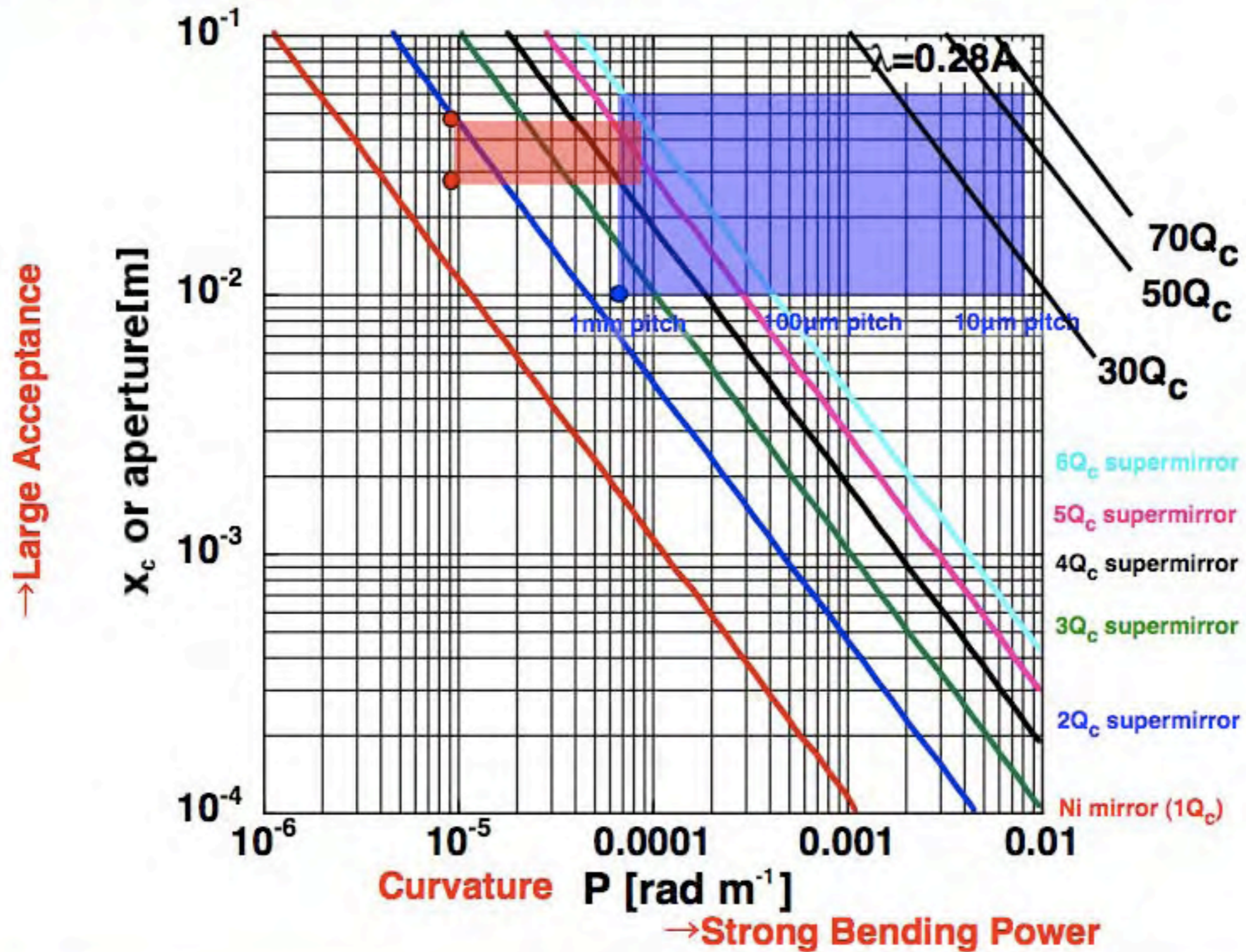
Prism MgF₂
 area: 10mm x 50mm
 thickness: 1mm (per piece)
 50 layer-stack for $\lambda=11.4\text{\AA}$
 refraction angle: 4.3mrad
 (8mrad $\lambda=15.5\text{\AA}$)
 transmission 80%

- 6Q_c supermirror
- 5Q_c supermirror
- 4Q_c supermirror
- 3Q_c supermirror
- 2Q_c supermirror
- Ni mirror (1Q_c)

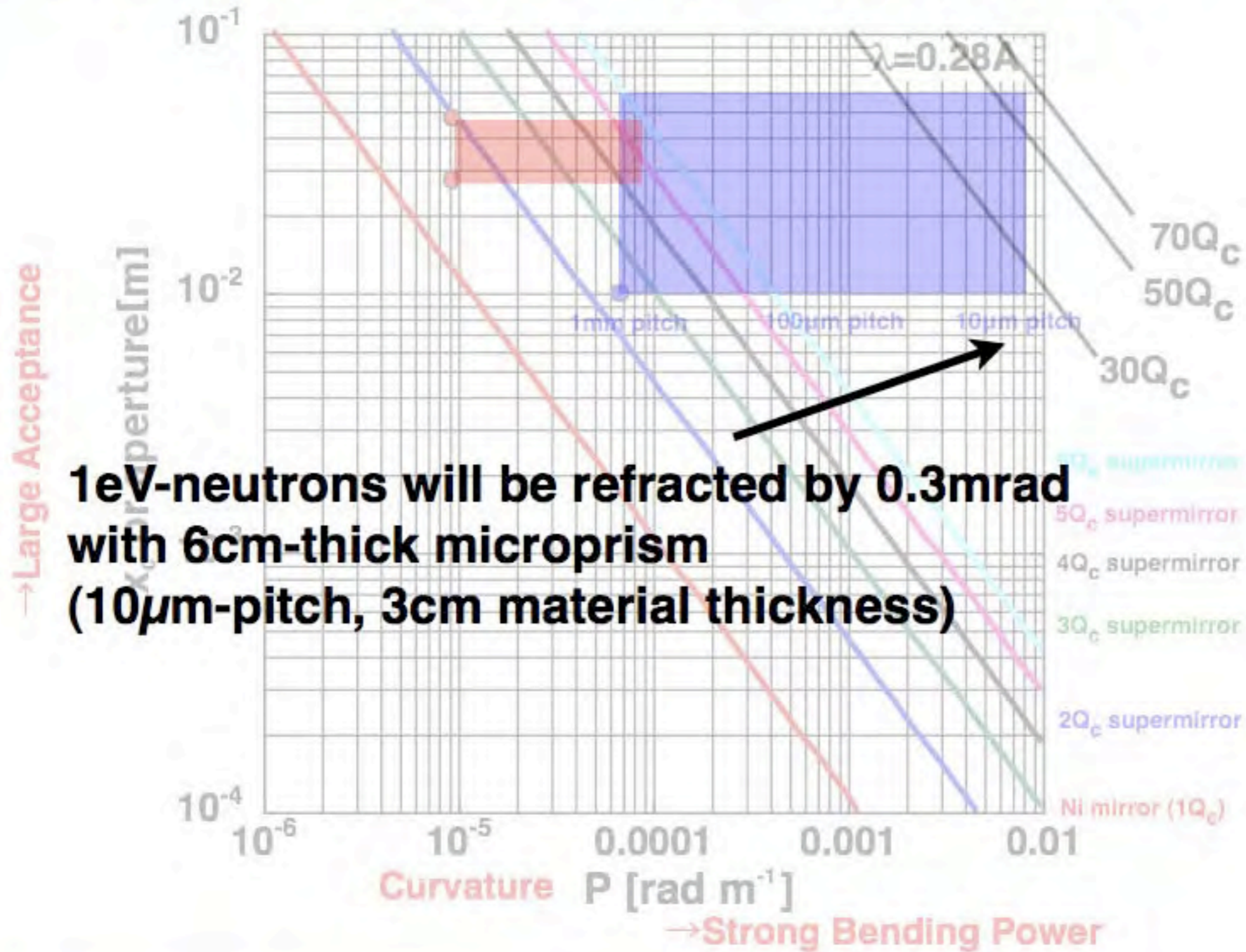
Curvature P [rad m⁻¹] → Strong Bending Power



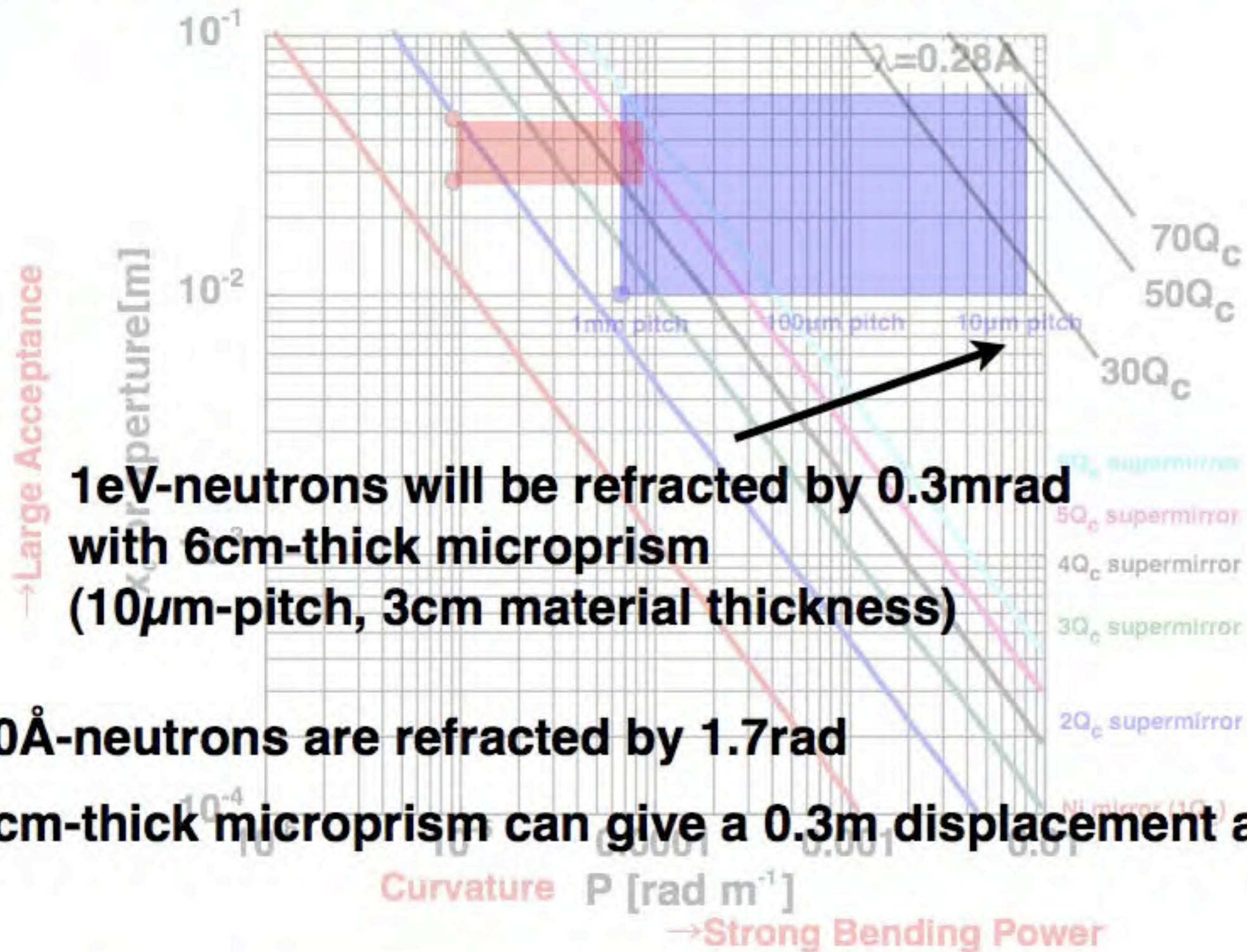
Comparison of Bending Power and Aperture for Epithermal Neutrons (Small Pitch Microprisms)



Comparison of Bending Power and Aperture for Epithermal Neutrons (Small Pitch Microprisms)



Comparison of Bending Power and Aperture for Epithermal Neutrons (Small Pitch Microprisms)



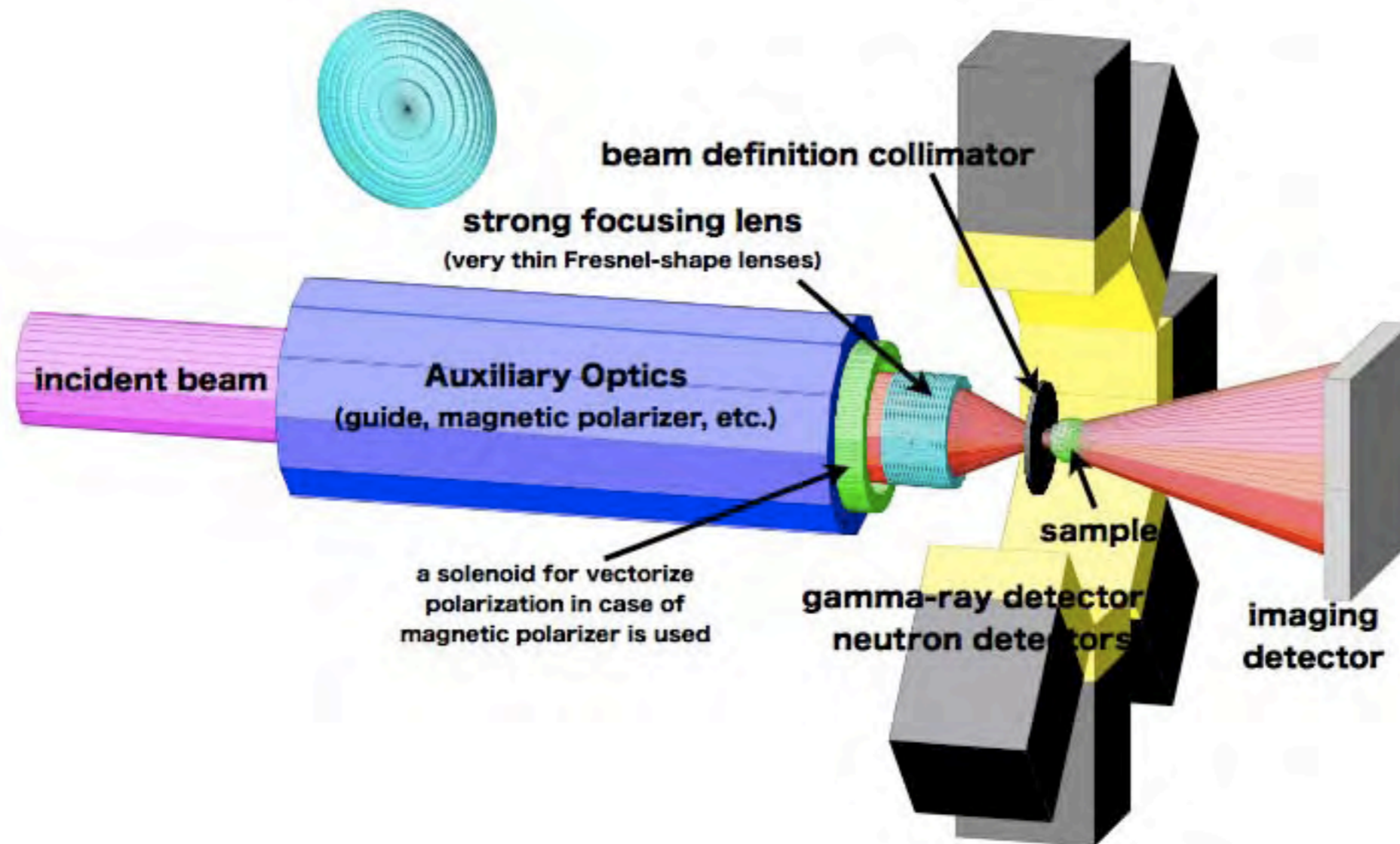
1eV-neutrons will be refracted by 0.3mrad
with 6cm-thick microprism
(10μm-pitch, 3cm material thickness)

⇔ 20Å-neutrons are refracted by 1.7rad

⇔ 1cm-thick microprism can give a 0.3m displacement at 1m



Neutron Mesoscope with a Micro-Fresnel stack



1-1. 中性子光学基礎

(17) 中性子磁気屈折光学 (磁気レンズ)

中性子磁気光学は、非一様磁場中で中性子が受ける加速度を利用した光学系です。正確な結像性能を最大の特徴とし、スピン偏極したビームを出力します。結像性能を重視する場合には六重極磁場が用いられます。



超伝導六極電磁石レンズ
口径が大きいことが特徴です。



Extended Halbach磁極配列六極永久磁石レンズ
コンパクトでメンテナンスフリー。実用上使いやすく、最も安価です。



パルス六極電磁石レンズ
パルス中性子源に対応可能なパルス電磁石です。

磁場中での運動方程式

中性子は電荷を持っていませんが、磁気双極子率 (μ) を持っているため、磁場と相互作用します。中性子の磁場中での運動は、スピンのラーモア歳差運動と、磁場の非一様性が与える加速度の連立方程式として記述されます。ラーモア歳差運動は中性子の運動に比べて十分に速く、中性子スピンの磁場に対する向きがほぼ固定され、歳差軸が磁場に追従するようになります。この時、運動方程式は次の単一の方程式で記述できます。符号は、スピンの磁場と平行な場合に正、反平行な場合に負です。スピンの平行な場合を“正極性”、スピンの反平行な場合を“負極性”と呼ぶことにします。

$$\frac{d^2 r}{dt^2} \pm \left| \frac{\mu}{m_n} \right| \nabla |B| = 0$$



中性子の軌道

z 方向に無限に長い多重極磁場を考えます。 $2n$ 重極の磁場強度は、磁石の軸からの距離を ρ とおくと、次のように与えられます。

$$|B| = C_{n-1} \rho^{n-1}$$

特に六重極 ($n=3$) の場合には、運動方程式は次のようになります。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} \pm \omega^2 x &= 0 \\ \frac{d^2 y}{dt^2} \pm \omega^2 y &= 0 \end{aligned}$$

この場合には、中性子の軌道は次のように解析的に求まります。

正極性の場合

$$\begin{aligned} x &= x_0 \cos \omega t + (v_{x0}/\omega) \sin \omega t \\ y &= y_0 \cos \omega t + (v_{y0}/\omega) \sin \omega t \end{aligned}$$

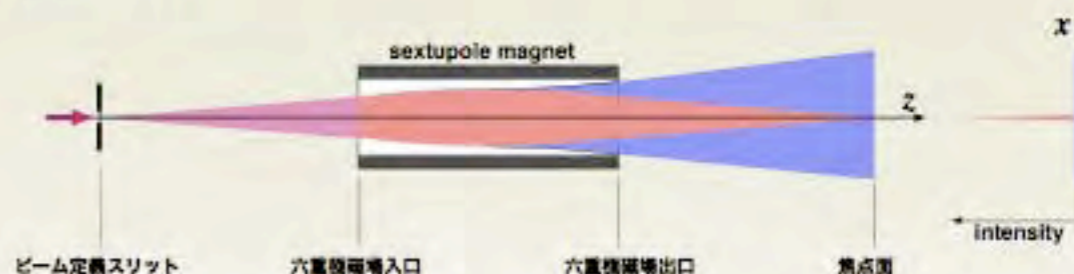
負極性の場合

$$\begin{aligned} x &= x_0 \cosh \omega t + (v_{x0}/\omega) \sinh \omega t \\ y &= y_0 \cosh \omega t + (v_{y0}/\omega) \sinh \omega t \end{aligned}$$

中性子のスピンの向きによって軌道が異なります。

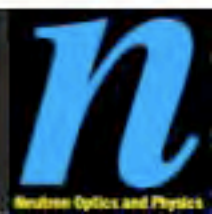
磁気レンズの機能

非偏極中性子が入射した場合を例に説明します。簡単のために、中性子源は点光源だとします。磁場がある空間に入ると中性子スピンの磁気量子数が量子化され、その後 (近似的に) 固定されます。正極性の成分は正弦曲線を描きながら磁石軸に近づき、磁石下流で一点に集まります。負極性の成分は双曲正弦曲線を描きながら磁石軸から遠ざかり、磁石内壁面に当たって失われたり、磁石下流では散逸します。



レンズ内部には物質がありませんから、正極性成分の軌道は電磁気学によって正確に記述され、損失無く下流に輸送されることが、磁気レンズの大きな特徴です。また、スピンの向きによって選択的に集光されるため、出力ビームがスピン偏極を持つことも重要な機能です。スピン偏極度は幾何学的に決まるので、正確なスピン偏極度を達成できます。

このような機能は、六重極磁場に限らず、一般の多重極磁場が持っています。



非一様磁場中での中性子の運動方程式

$$\frac{d\boldsymbol{\mu}}{dt} = \gamma \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B} \quad \text{Larmor 歳差}$$

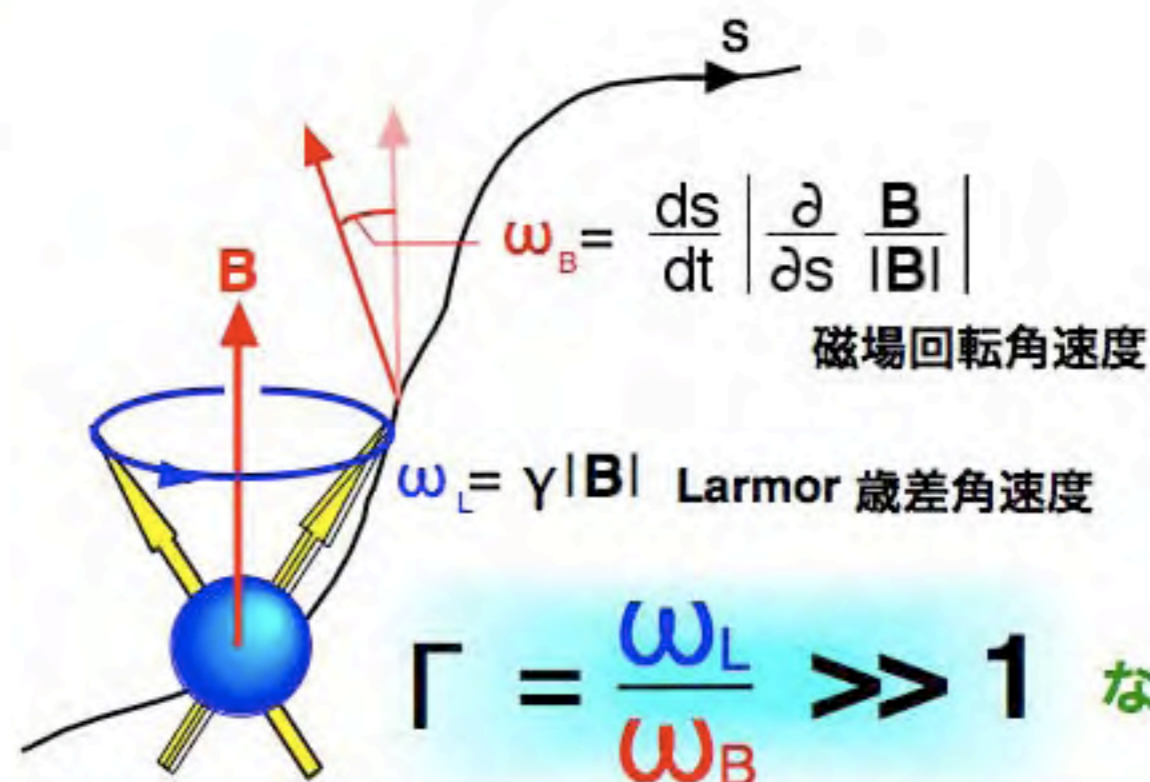
$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \nabla (\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B})$$

中性子のスピン極性

正極性



負極性



スピン極性はほぼ保存される

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \pm \left| \frac{\mu}{m} \right| \nabla |\mathbf{B}| = 0$$

正極性 (red text above the plus sign)

負極性 (blue text below the minus sign)

Magnetic Optics (General Multipole)

Equation of Motion in Inhomogeneous Magnetic Field

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mp \frac{\mu}{m} \nabla |\mathbf{B}|$$

spin parallel (above the sign)
spin anti-parallel (below the sign)
as long as $\omega_L \gg \omega_B$

$$|\mathbf{B}| = B_0 (\rho / \rho_0)^{n-1}$$

n=2: quadrupole
n=3: sextupole
n=4: octapole
...
n → ∞: neutron (mirror) guide

$$\frac{d^2 X}{d\theta^2} = \mp X (X^2 + Y^2)^{(n-3)/2}$$

$$\frac{d^2 Y}{d\theta^2} = \mp Y (X^2 + Y^2)^{(n-3)/2}$$

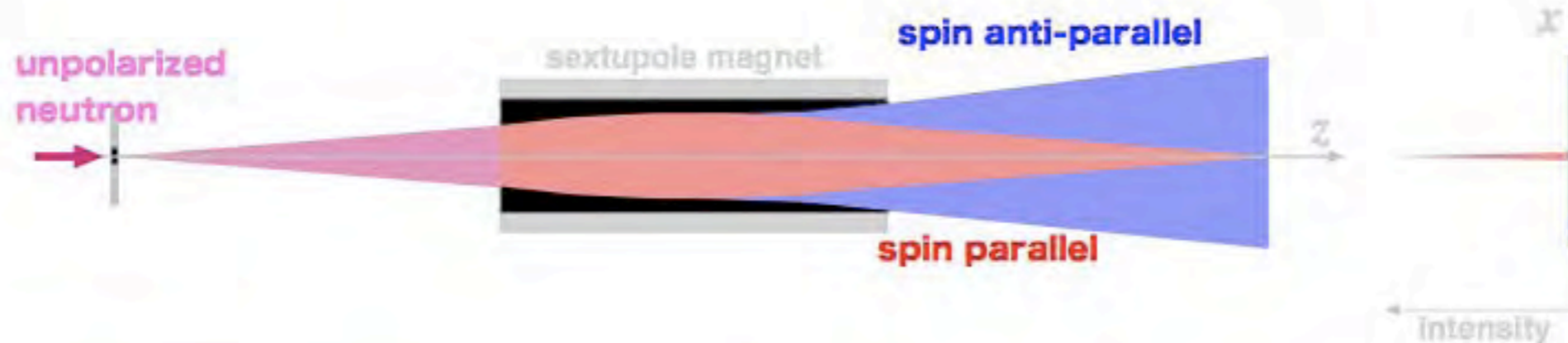
$$\omega^2 = (n-1) B_0 \mu / m \rho_0^2$$

$$X = x / \rho_0$$

$$Y = y / \rho_0$$

$$\Xi = dX / d\theta$$

$$H = dY / d\theta$$



Magnetic Optics (Sextupole)

Equation of Motion in Inhomogeneous Magnetic Field

spin parallel

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \mp \frac{\mu}{m} \nabla |B|$$

spin anti-parallel

as long as $\omega_L \gg \omega_B$

$$|B| = B_0 (\rho / \rho_0)^{n-1}$$

n=2: quadrupole (spin filter)

n=3: sextupole (focusing lens)

n=4: octapole

...

n → ∞: neutron (mirror) guide

$$\frac{d^2 X}{d\theta^2} = \mp X$$

$$\frac{d^2 Y}{d\theta^2} = \mp Y$$

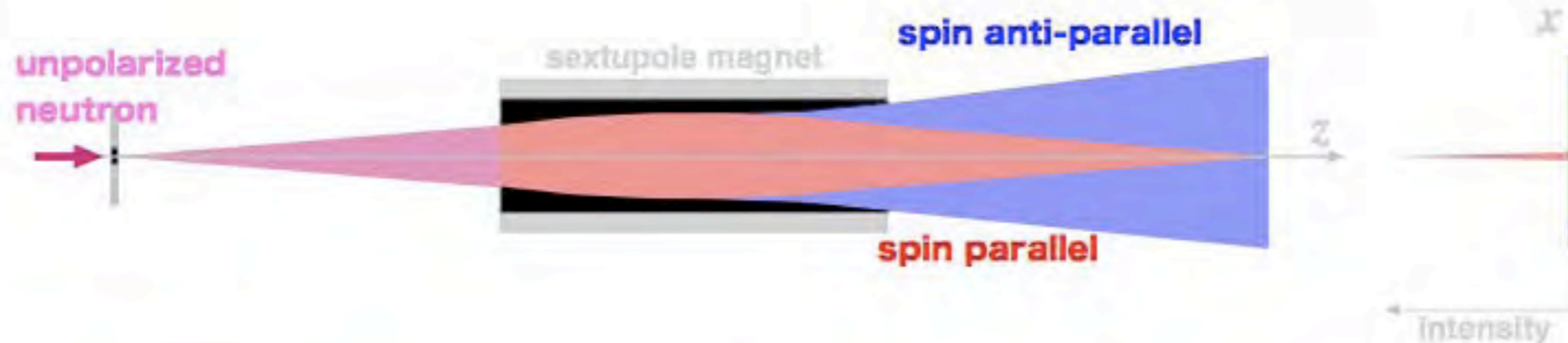
$$\omega^2 = (n-1) B_0 \mu / m \rho_0^2$$

$$X = x / \rho_0$$

$$Y = y / \rho_0$$

$$\Xi = dX / d\theta$$

$$H = dY / d\theta$$



Sextupole (no boundary)

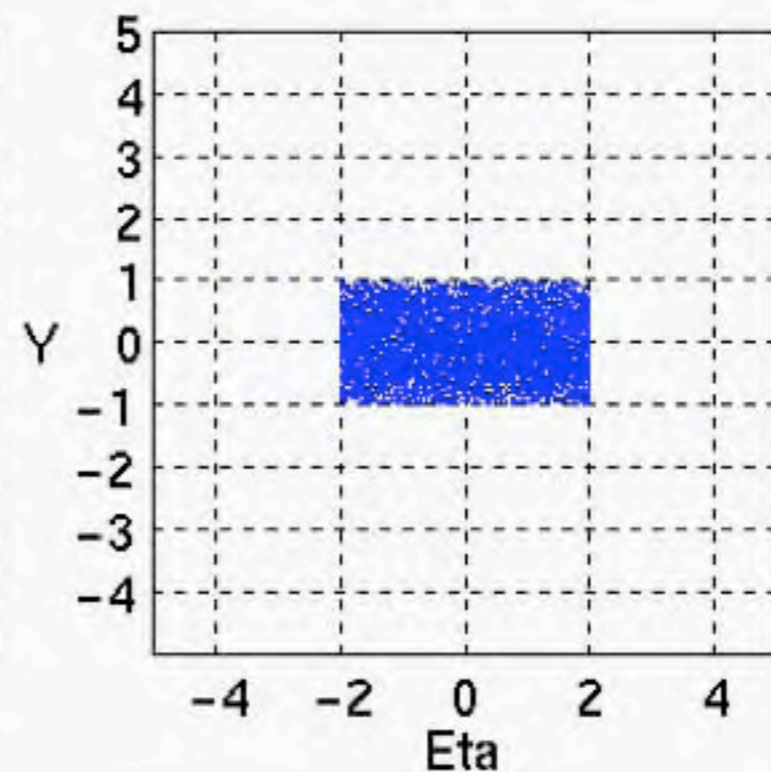
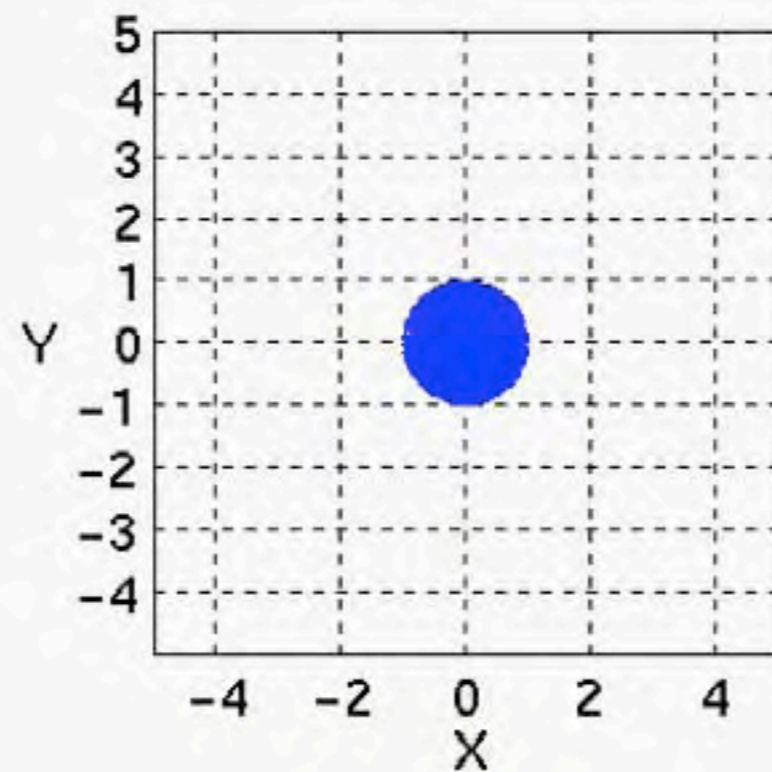
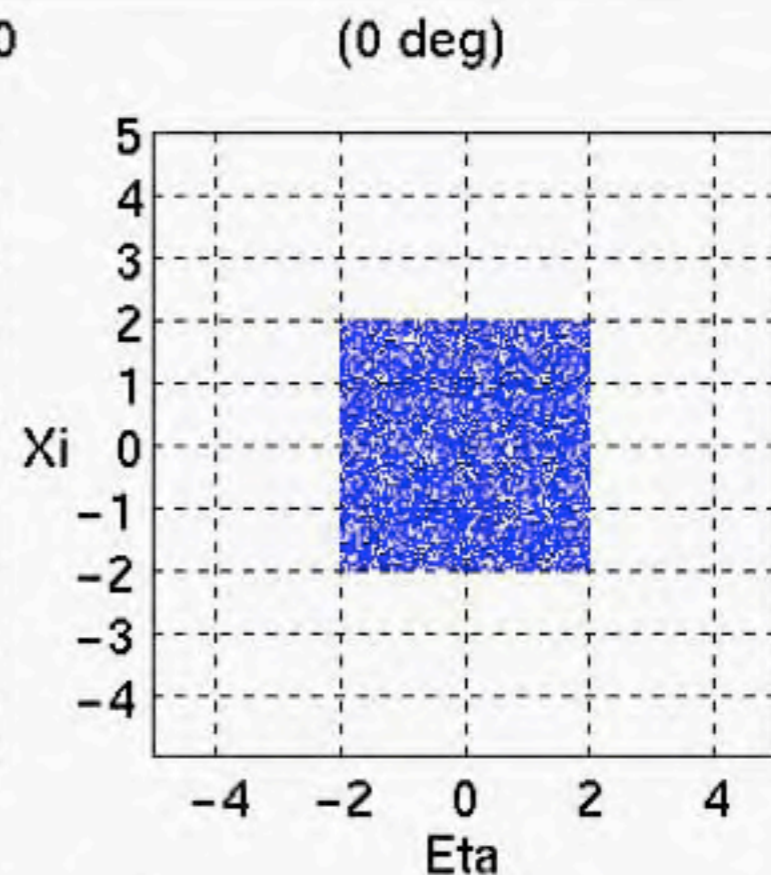
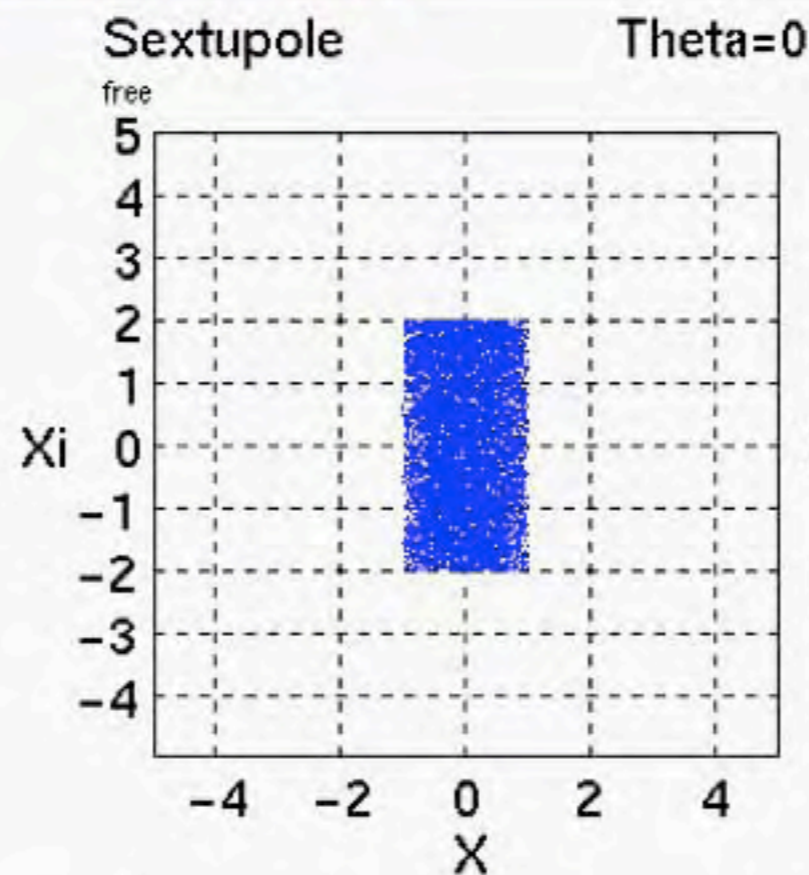
$$\frac{d^2X}{d\theta^2} = \mp X$$
$$\frac{d^2Y}{d\theta^2} = \mp Y$$

$$X = x/\rho_0$$

$$Y = y/\rho_0$$

$$\Xi = dX/d\theta$$

$$H = dY/d\theta$$



Sextupole (absorptive aperture boundary)

$$\frac{d^2X}{d\theta^2} = \mp X$$

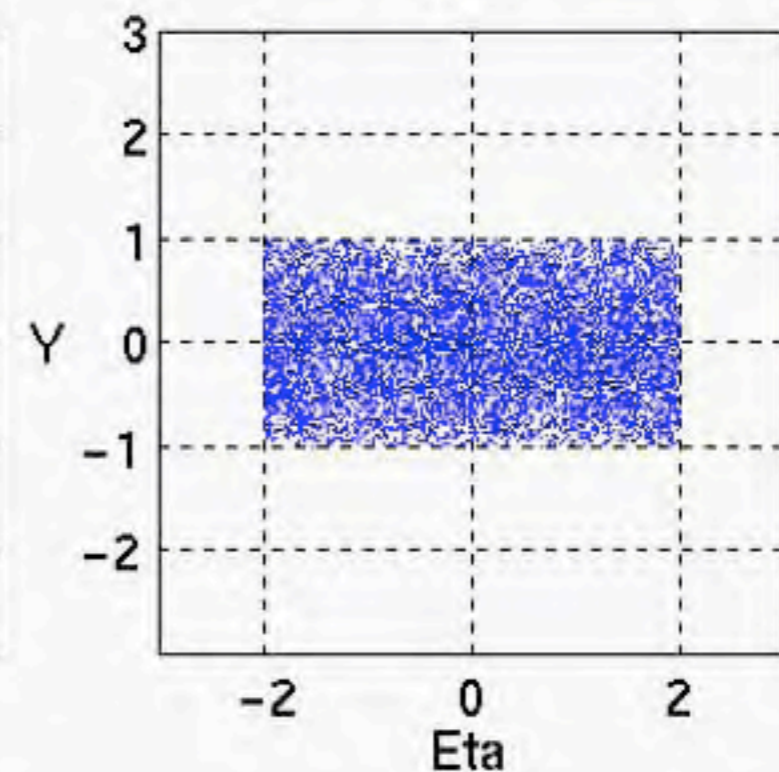
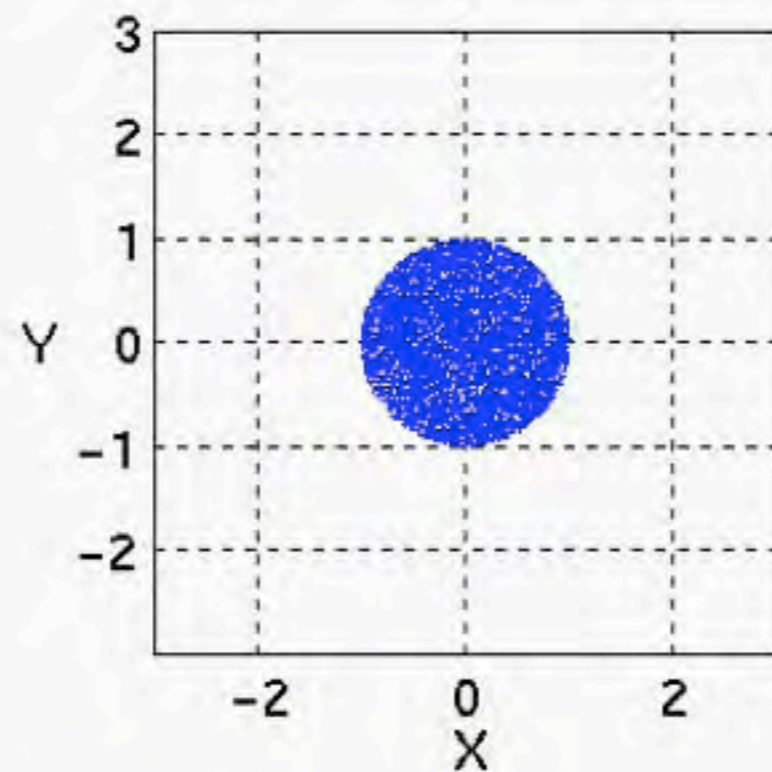
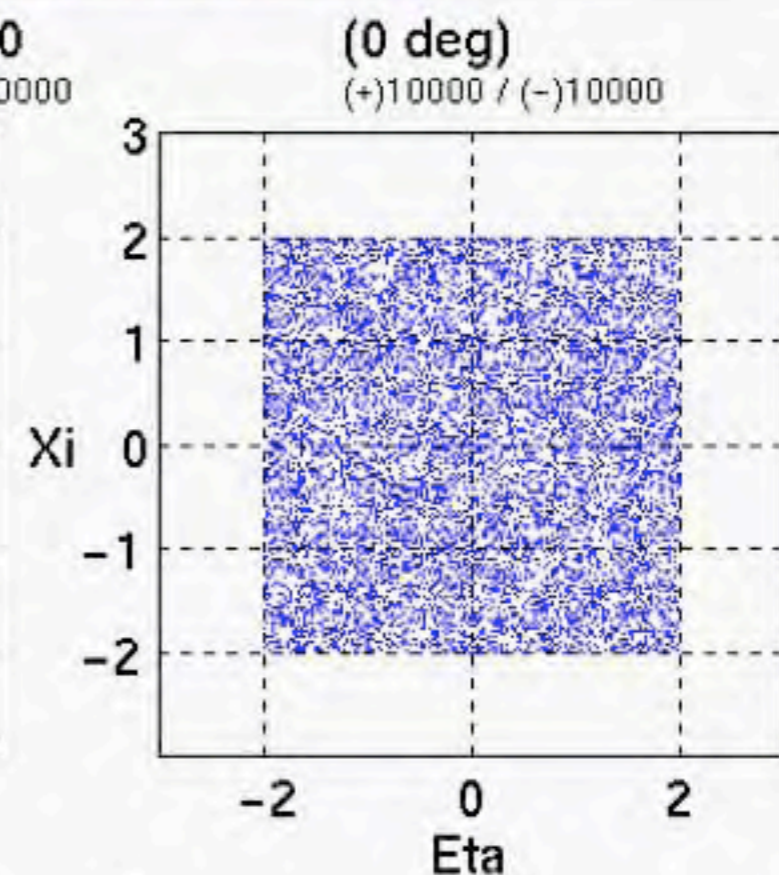
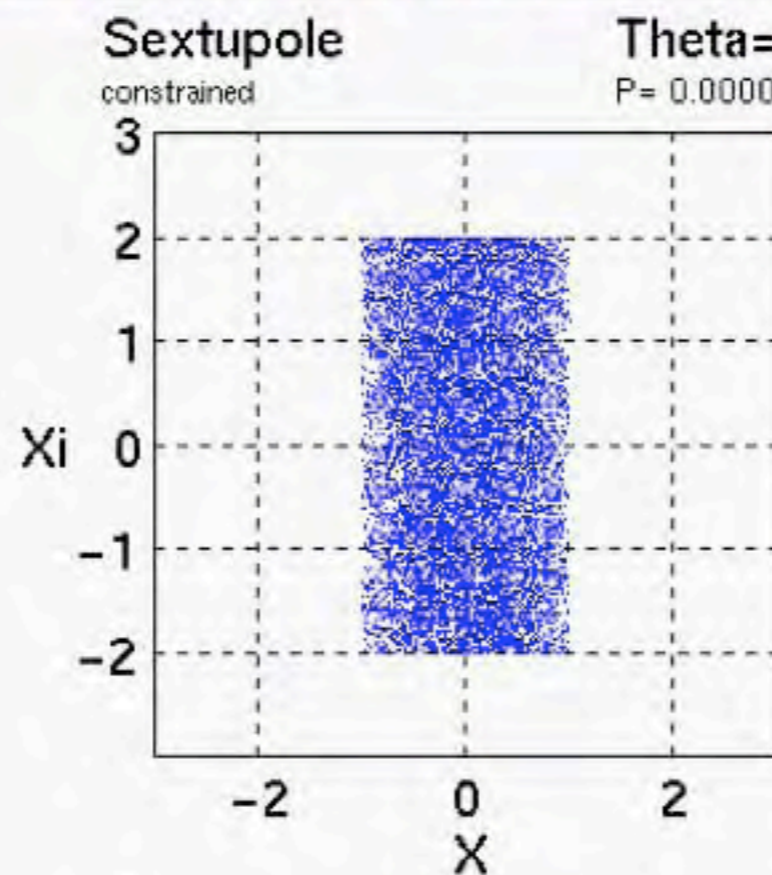
$$\frac{d^2Y}{d\theta^2} = \mp Y$$

$$X = x/\rho_0$$

$$Y = y/\rho_0$$

$$\Xi = dX/d\theta$$

$$H = dY/d\theta$$



Magnetic Optics in Phase Space

spin parallel
(positive polarity)

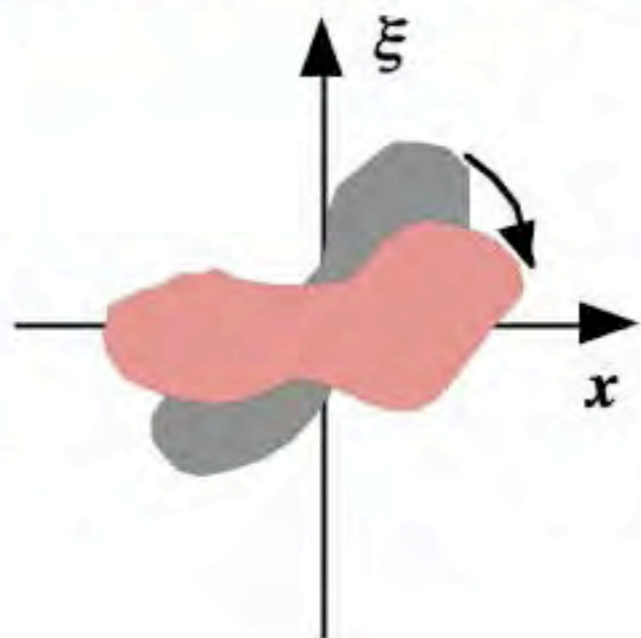
$$\frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = \mp \omega^2 \mathbf{x}$$

spin anti-parallel
(negative polarity)

$$\xi = v_x / \omega$$

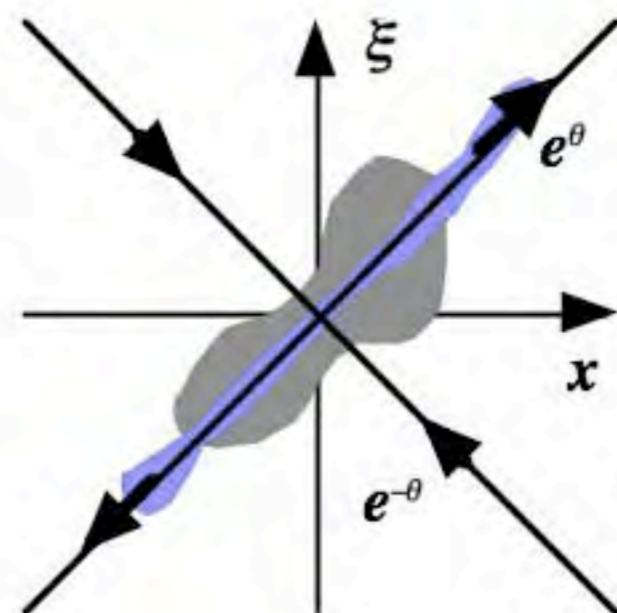
spin parallel
(positive polarity)

$$\begin{pmatrix} x \\ \xi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ \xi_0 \end{pmatrix}$$

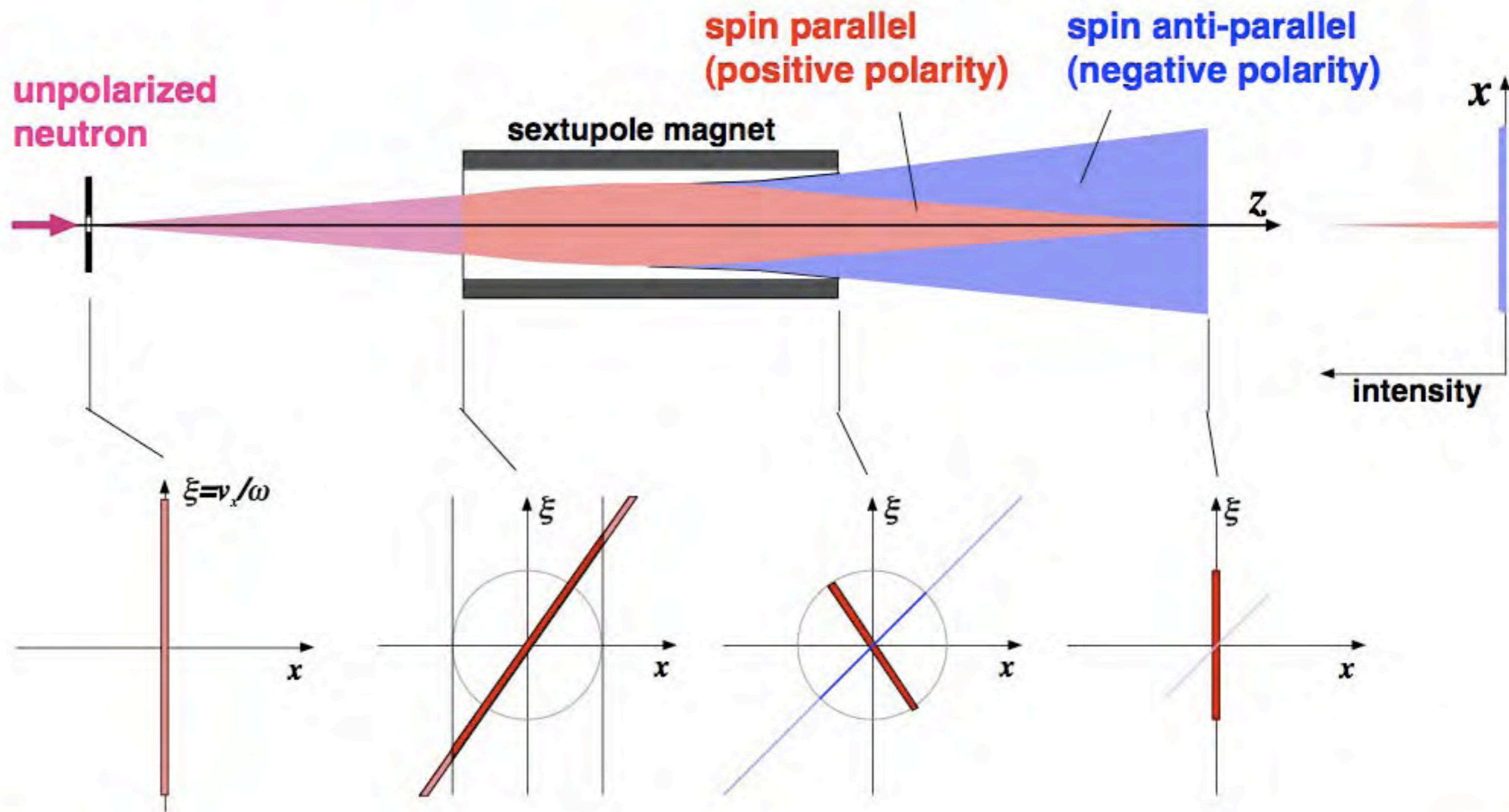


spin anti-parallel
(negative polarity)

$$\begin{pmatrix} x \\ \xi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \theta & \sinh \theta \\ -\sinh \theta & \cosh \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ \xi_0 \end{pmatrix}$$



Magnetic Optics in Phase Space



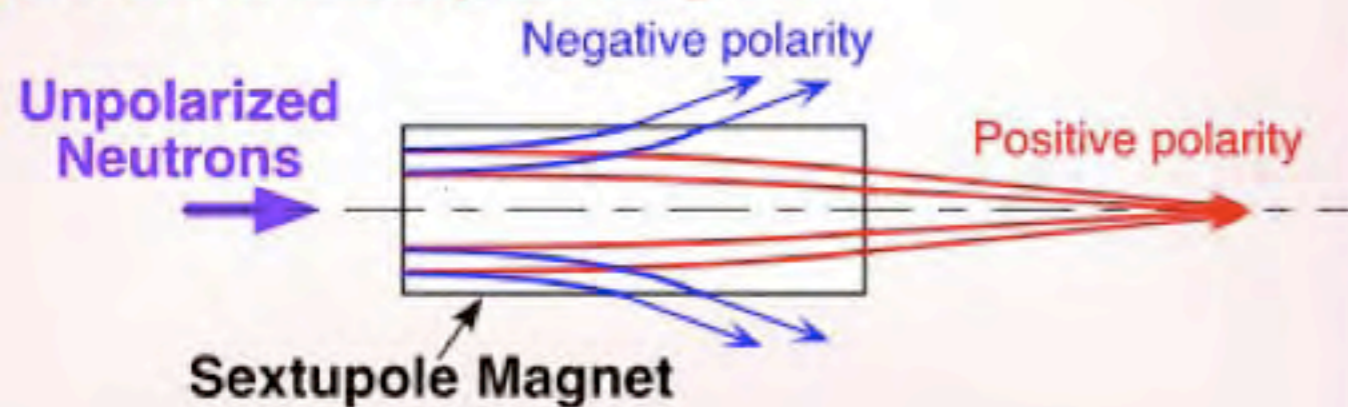
Sextupole Field

$$|B| = \frac{G}{2}(x^2 + y^2)$$

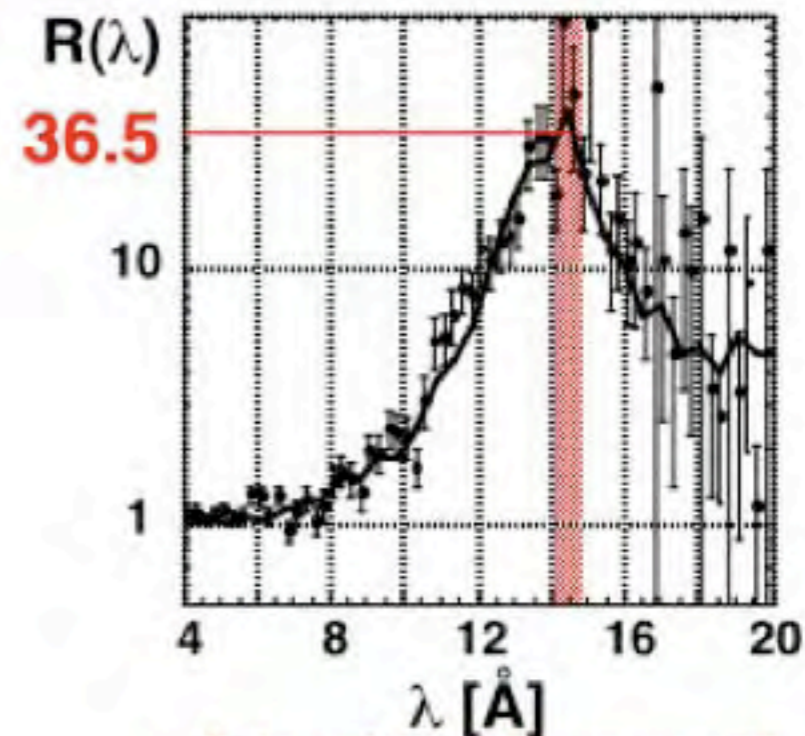
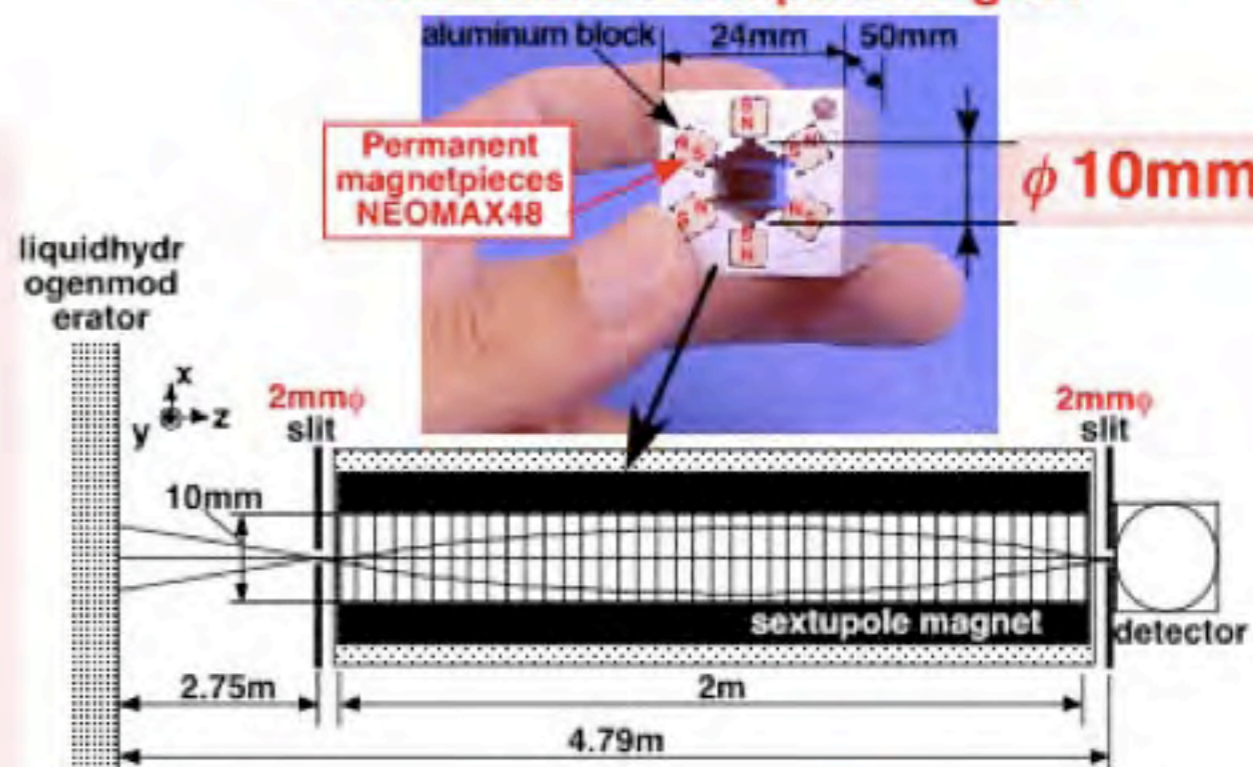
Equation of Motion in Sextupole field

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \begin{matrix} \text{Positive polarity} \\ \downarrow \\ + \\ \uparrow \\ \text{Negative polarity} \end{matrix} \omega^2 x, \quad \omega^2 = G\mu/ml$$

Function of Sextupole Magnet



Permanent Sextupole Magnet



Intensity enhancement due to Magnetic effect

Magnetic Lenses under development



Superconducting
Sextupole Magnet



Extended Halbach
Sextupole Magnet



Sextupole Pulse
Electro-Magnet

mode	static	static	pulse
Magnet length Z_m	2 m	2 m (0.1m/unit)	2 m
Magnetic field gradient	12,800 Tm ⁻² @1.8K (9,480 Tm ⁻² @4.2K)	23,500 Tm ⁻²	10 ⁴ ~ 10 ⁵ Tm ⁻²
Effective aperture (diameter)	f 46.8 mm	f 25 mm	f 22 mm
Focal length Z_f^* for 6 Å	4.3 m @1.8K (5.3 m@4.2K)	2.9 m	< 2 ~ 5.1 m

Large Aperture

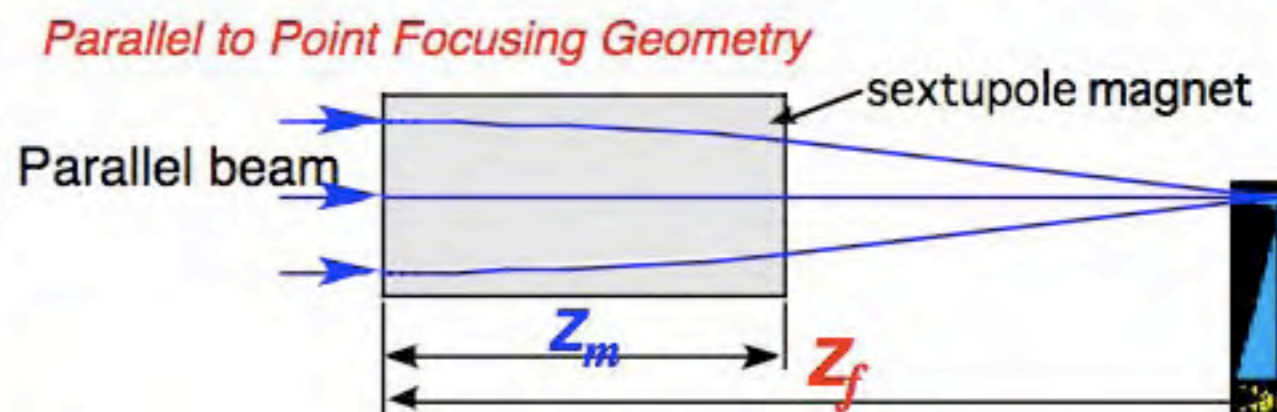
Compact, Maintenance Free

Polychromatic Focus

*₁) Definition of the Focal length



$$Z_f = Z_m + \frac{h}{\sqrt{G\alpha m_n \lambda}} \cot\left(\frac{\sqrt{G\alpha m_n \lambda}}{h} Z_m\right)$$



Multipoles

Quadrupole (n=2)

$$\frac{d^2X}{d\theta^2} = \mp X(X^2+Y^2)^{-1/2}$$

$$\frac{d^2Y}{d\theta^2} = \mp Y(X^2+Y^2)^{-1/2}$$

Sextupole (n=3)

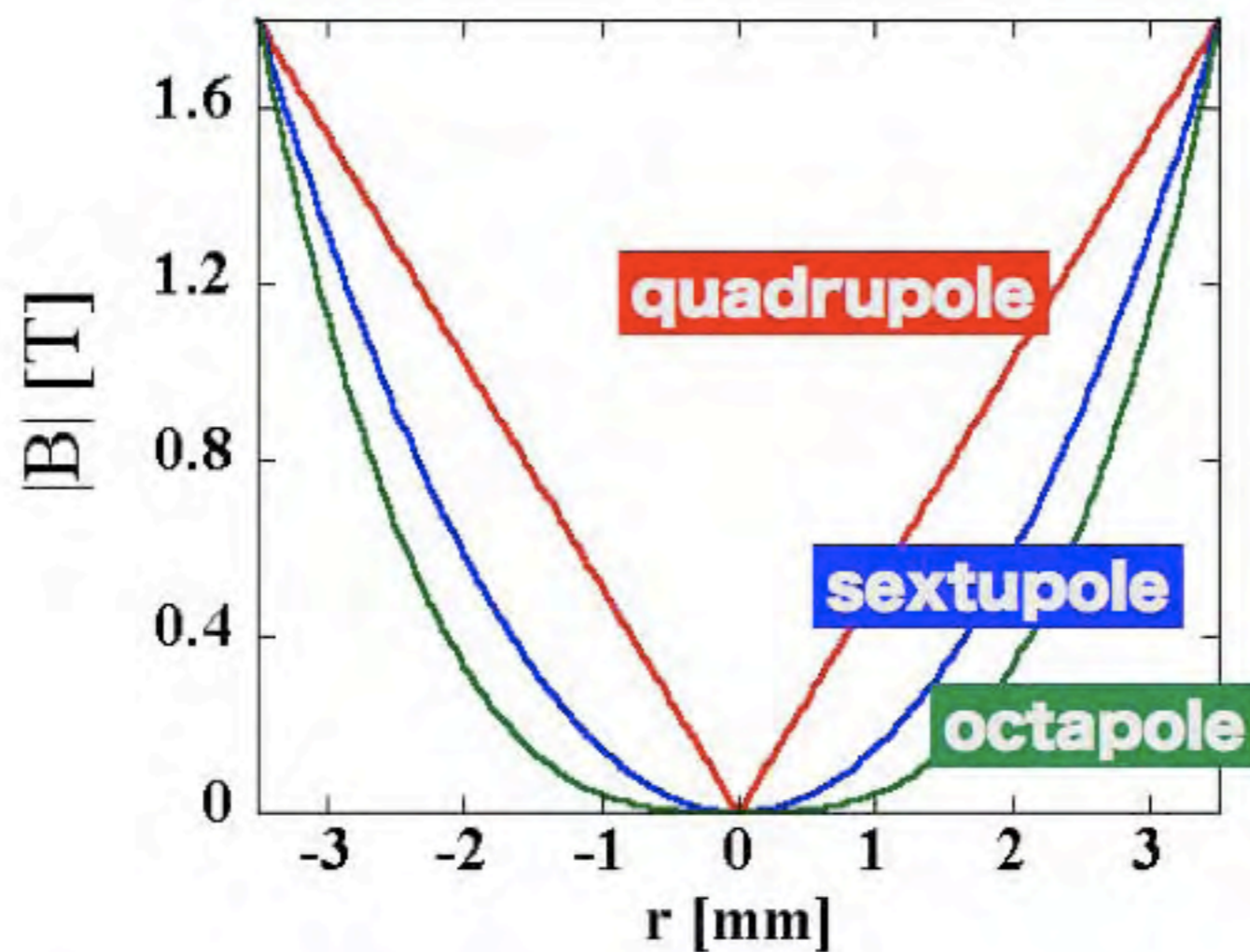
$$\frac{d^2X}{d\theta^2} = \mp X$$

$$\frac{d^2Y}{d\theta^2} = \mp Y$$

Octapole (n=4)

$$\frac{d^2X}{d\theta^2} = \mp X(X^2+Y^2)^{1/2}$$

$$\frac{d^2Y}{d\theta^2} = \mp Y(X^2+Y^2)^{1/2}$$

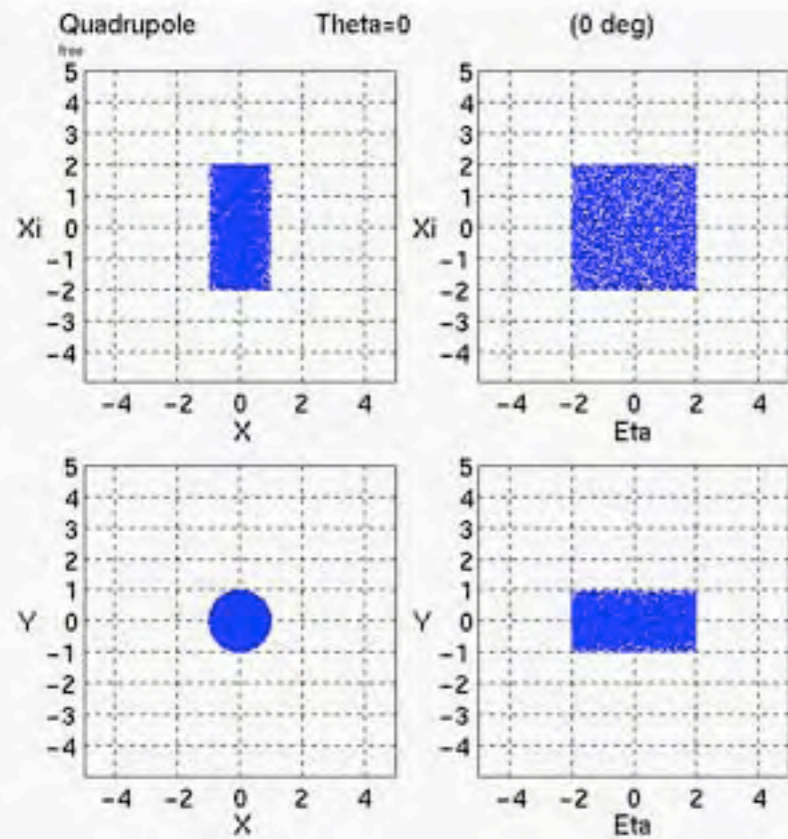


Multipoles (no boundary)

Quadrupole (n=2)

$$\frac{d^2X}{d\theta^2} = \mp X(X^2+Y^2)^{-1/2}$$

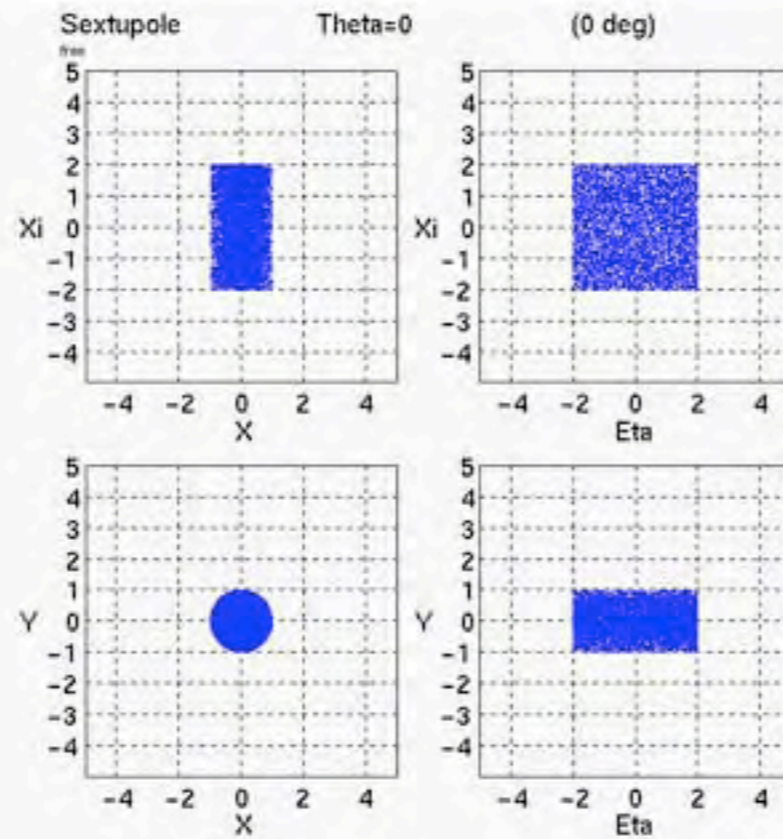
$$\frac{d^2Y}{d\theta^2} = \mp Y(X^2+Y^2)^{-1/2}$$



Sextupole (n=3)

$$\frac{d^2X}{d\theta^2} = \mp X$$

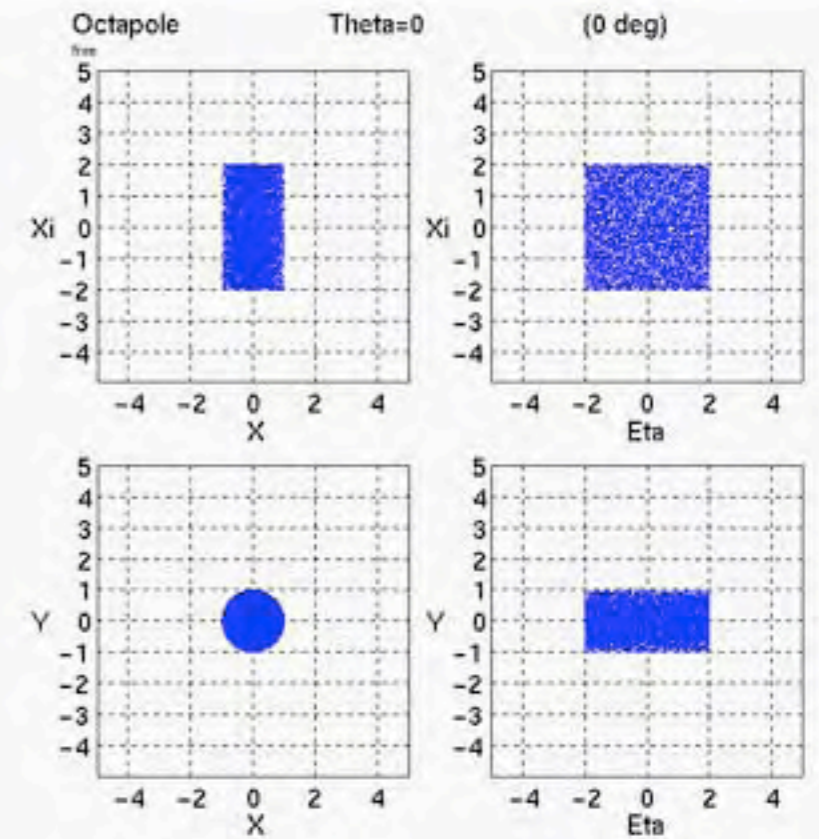
$$\frac{d^2Y}{d\theta^2} = \mp Y$$



Octapole (n=4)

$$\frac{d^2X}{d\theta^2} = \mp X(X^2+Y^2)^{1/2}$$

$$\frac{d^2Y}{d\theta^2} = \mp Y(X^2+Y^2)^{1/2}$$



Multipoles (absorptive boundary)

Quadrupole (n=2)

$$\frac{d^2X}{d\theta^2} = \mp X(X^2+Y^2)^{-1/2}$$

$$\frac{d^2Y}{d\theta^2} = \mp Y(X^2+Y^2)^{-1/2}$$

Sextupole (n=3)

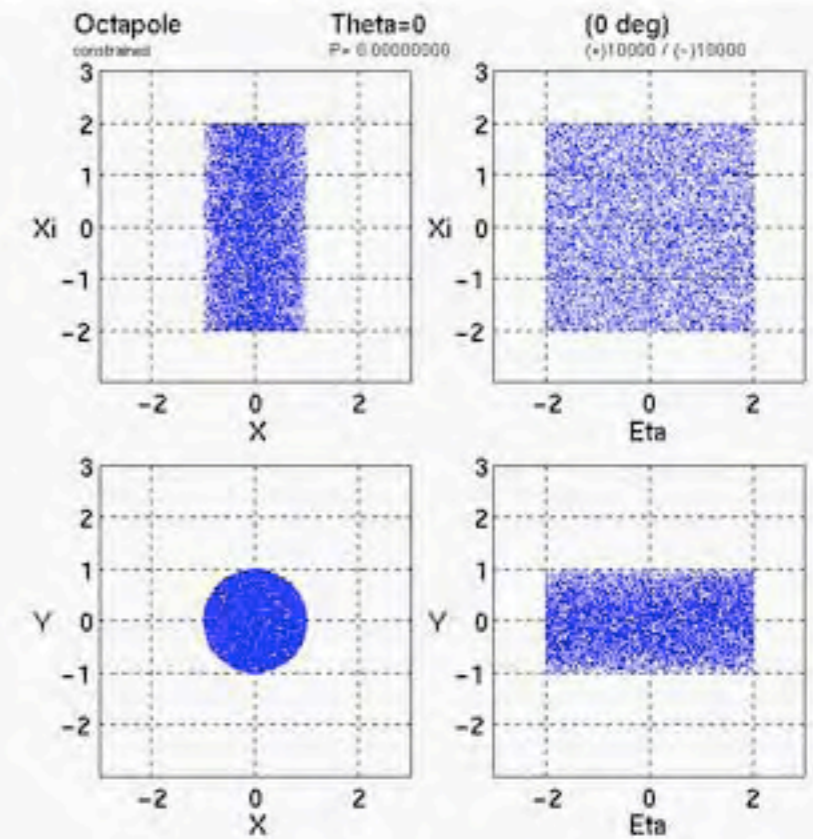
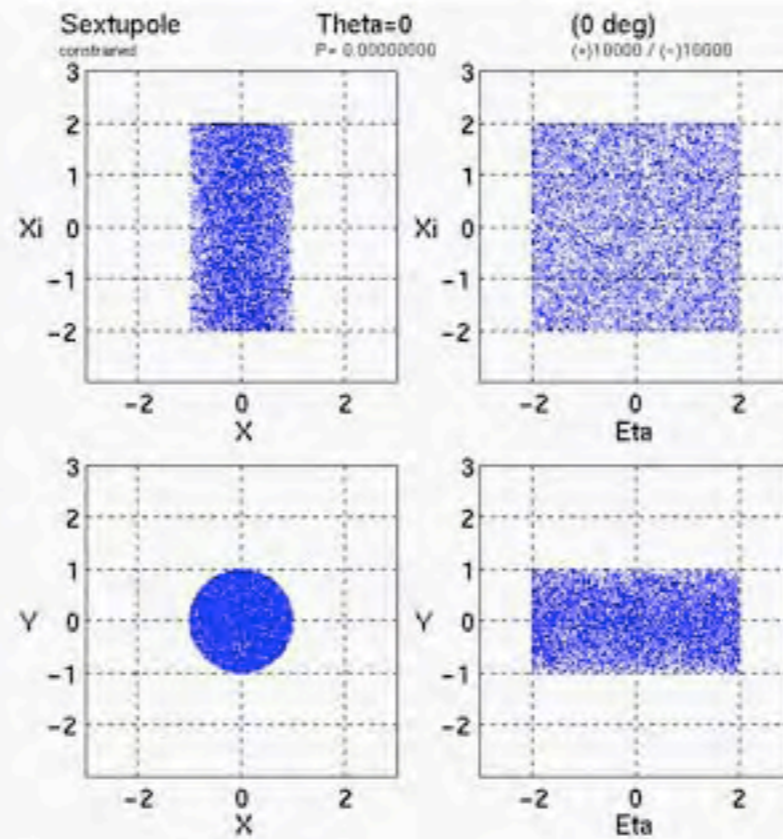
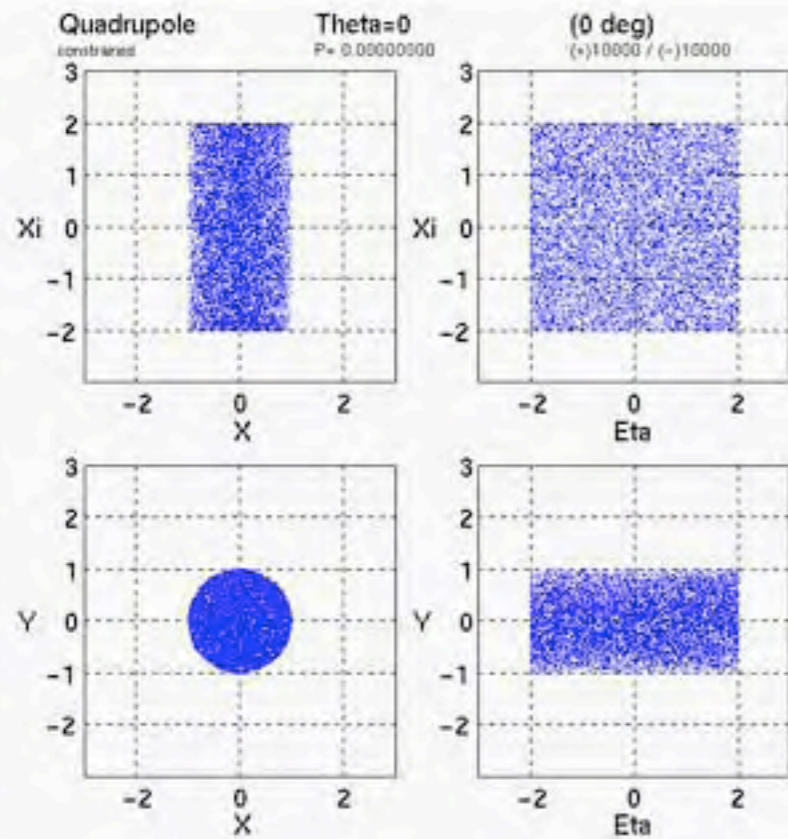
$$\frac{d^2X}{d\theta^2} = \mp X$$

$$\frac{d^2Y}{d\theta^2} = \mp Y$$

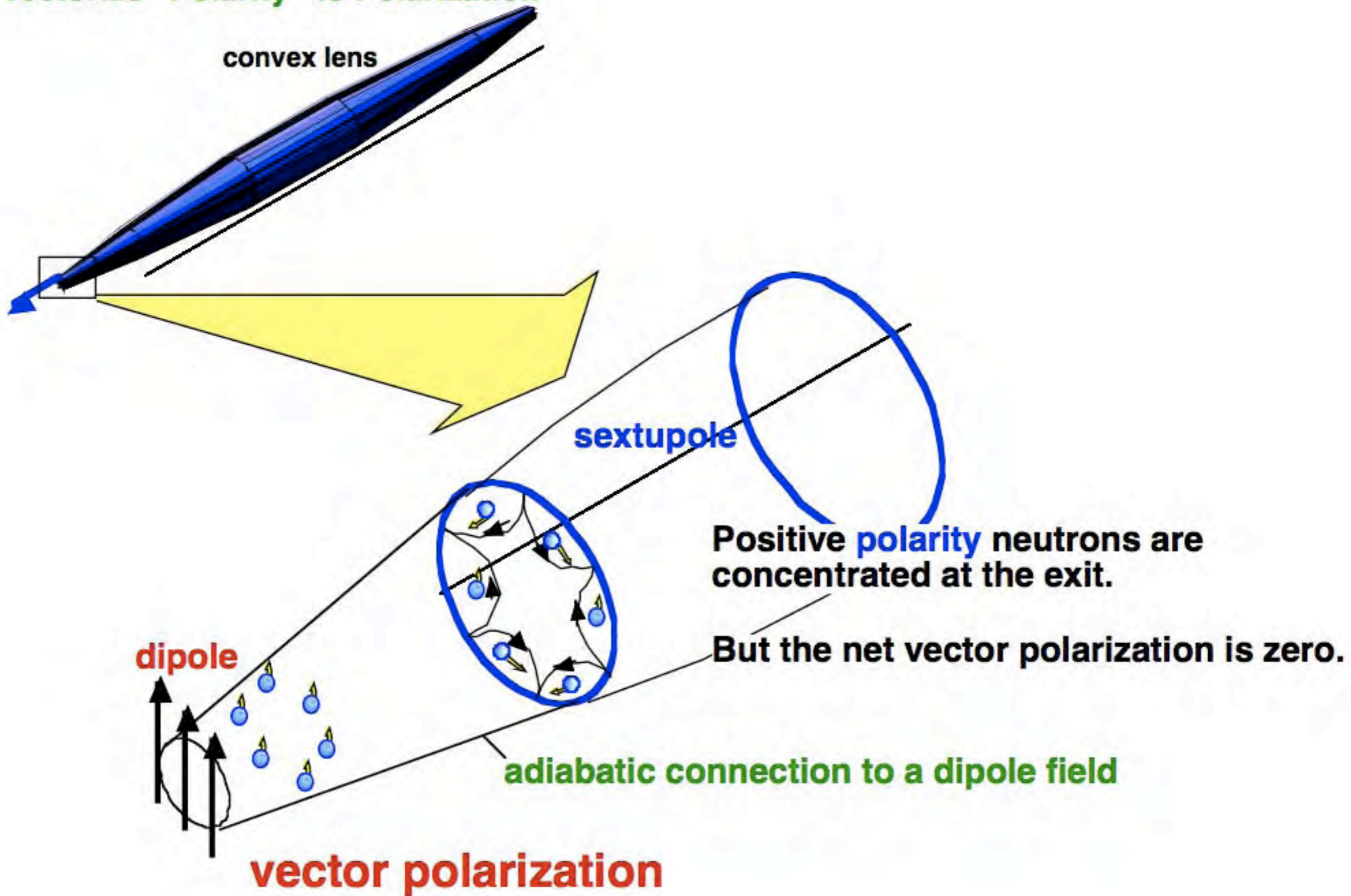
Octapole (n=4)

$$\frac{d^2X}{d\theta^2} = \mp X(X^2+Y^2)^{1/2}$$

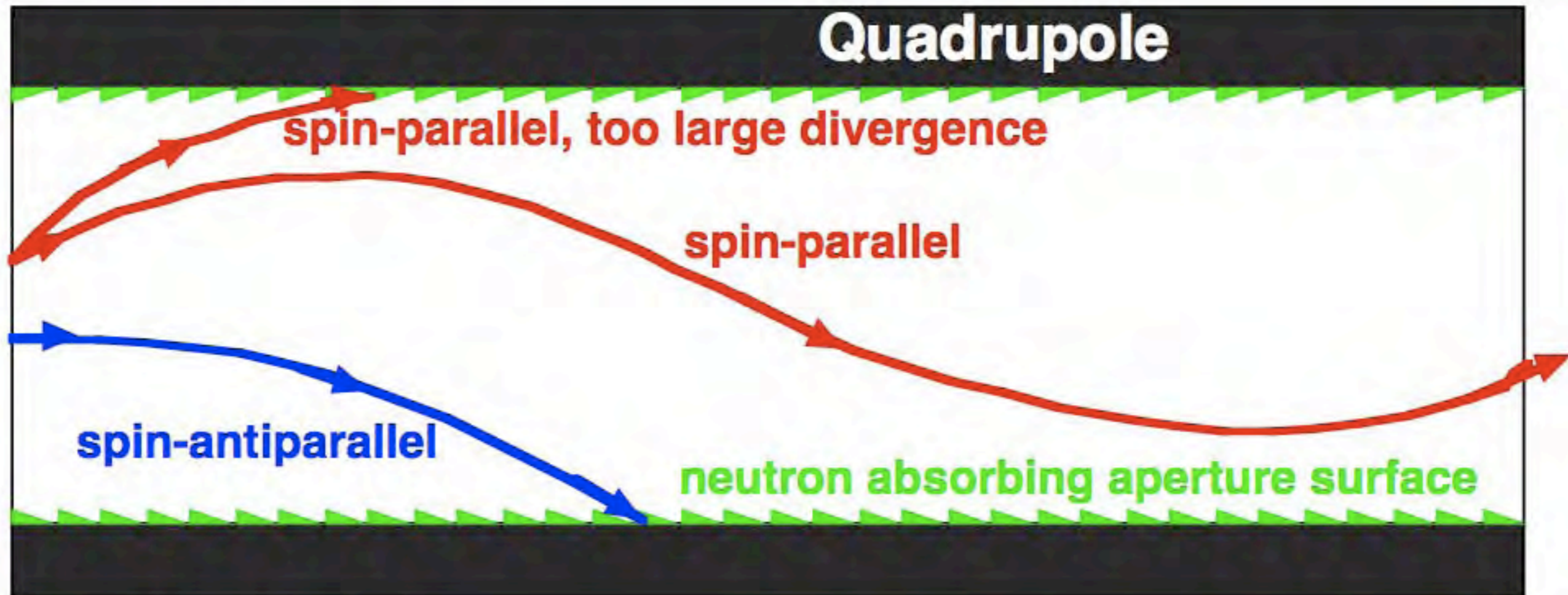
$$\frac{d^2Y}{d\theta^2} = \mp Y(X^2+Y^2)^{1/2}$$



Vectorize "Polarity" to Polarization



Magnetic Polarizer



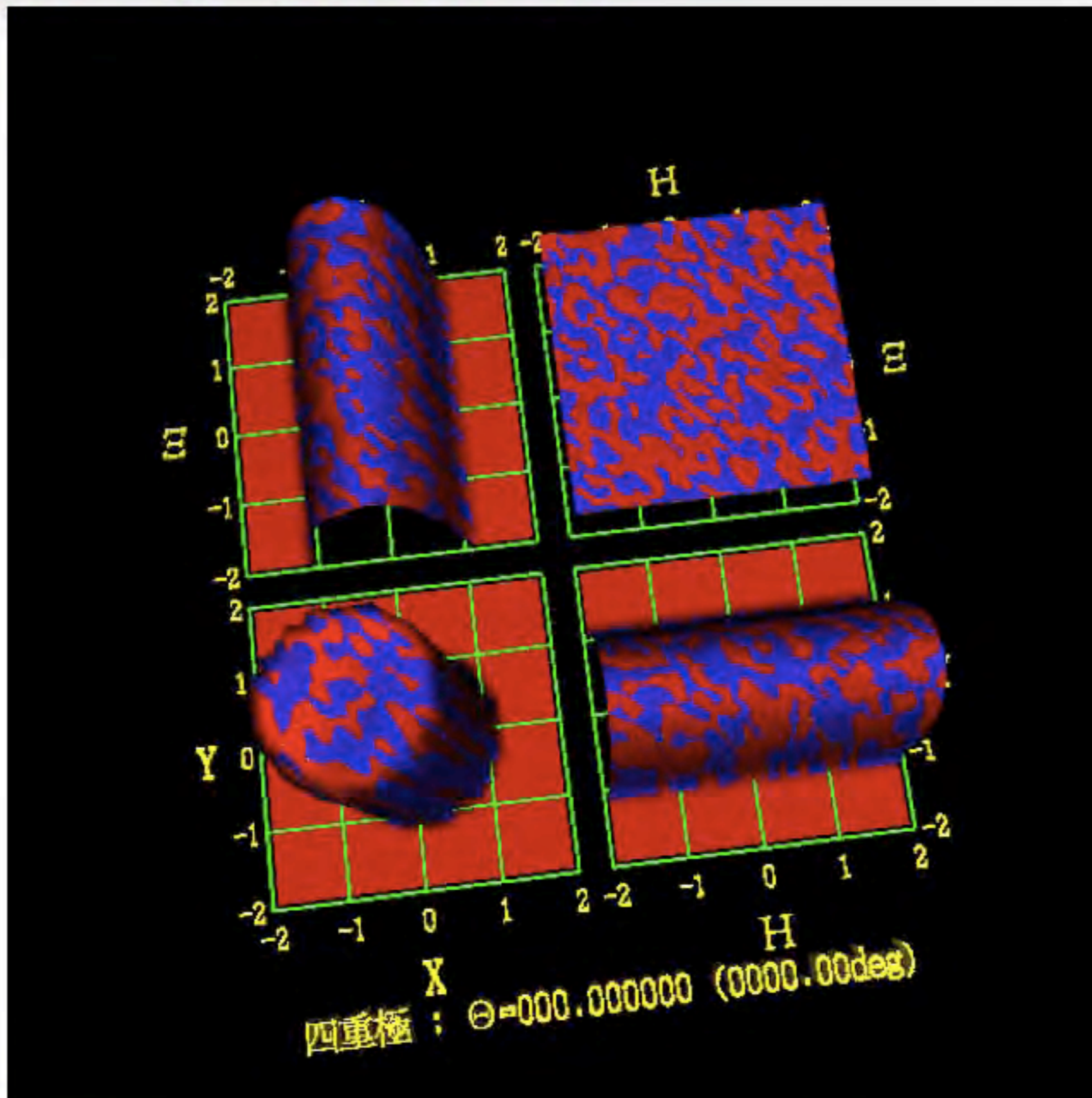
(1) spin filter

(2) collimator (divergence filter)

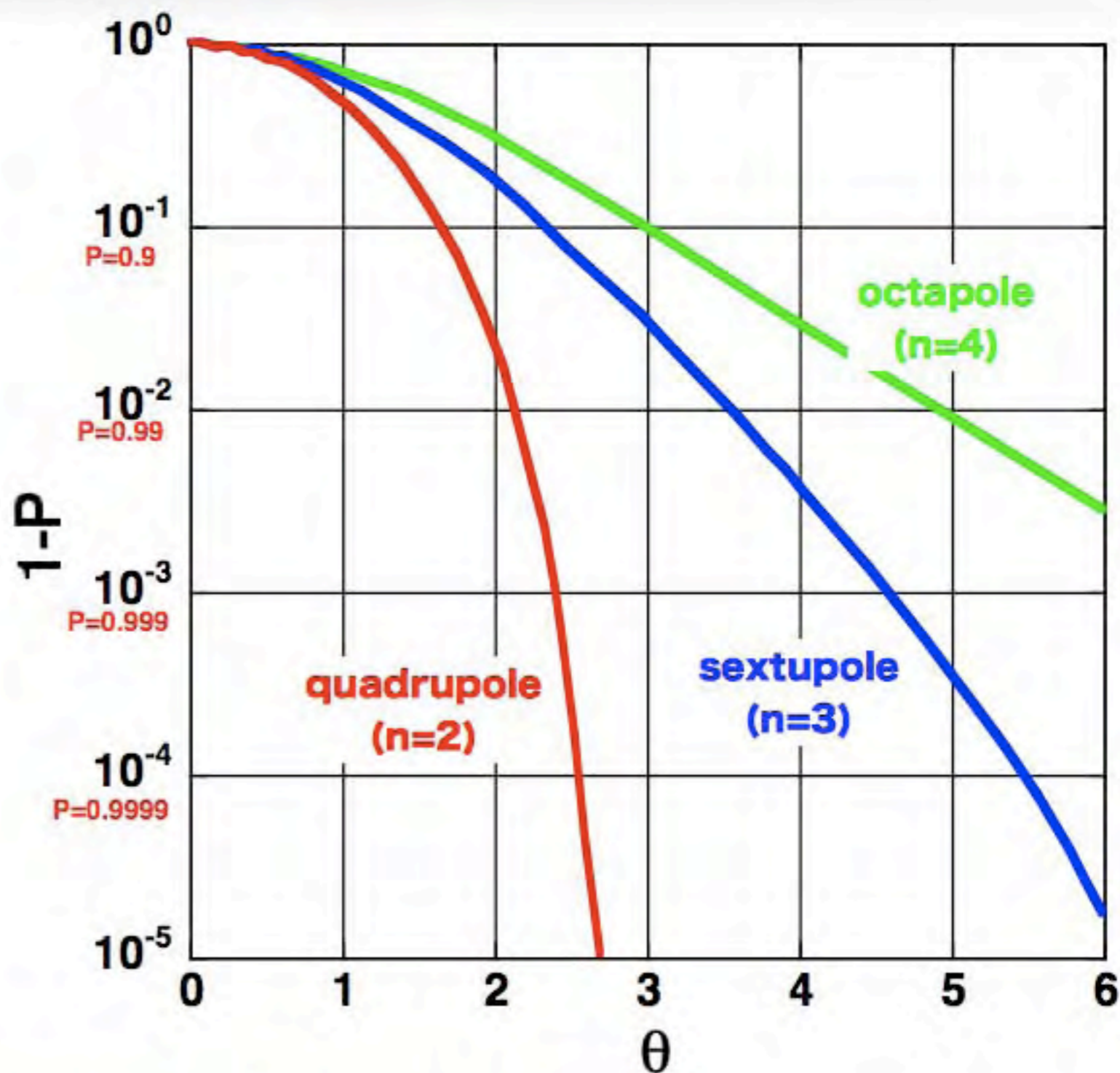
Quadrupole has the strongest power to kick unpreferred spin-components off the beam axis.



Quadrupole Magnetic Polarizer



Polarization



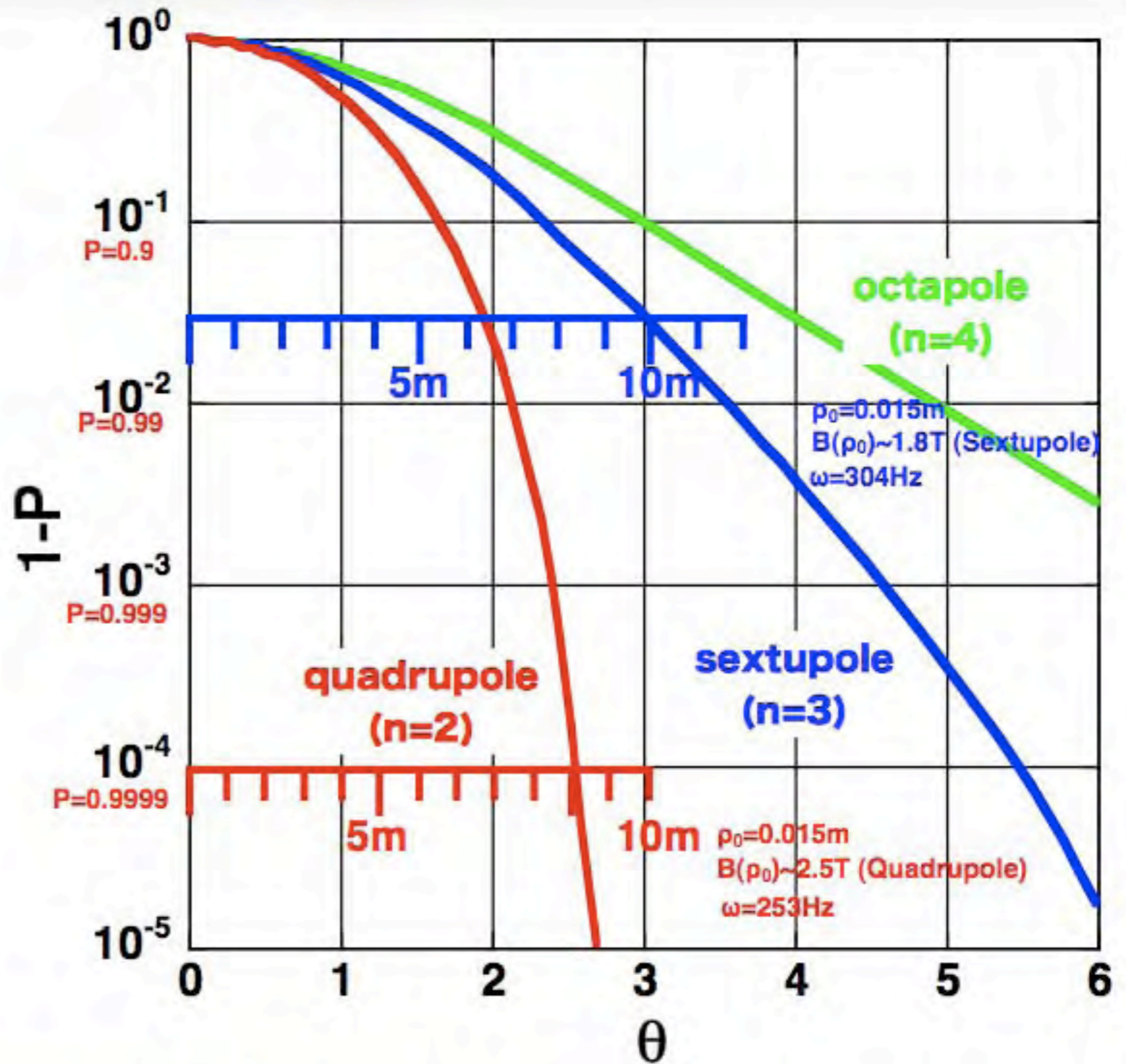
$$P > 0.9999 \Leftrightarrow \Delta P < 10^{-4},$$

for accurate determination of correlation terms in neutron β -decay
for extracting weak spin-flip processes



Polarization

$$\lambda = 4 \text{ \AA}$$



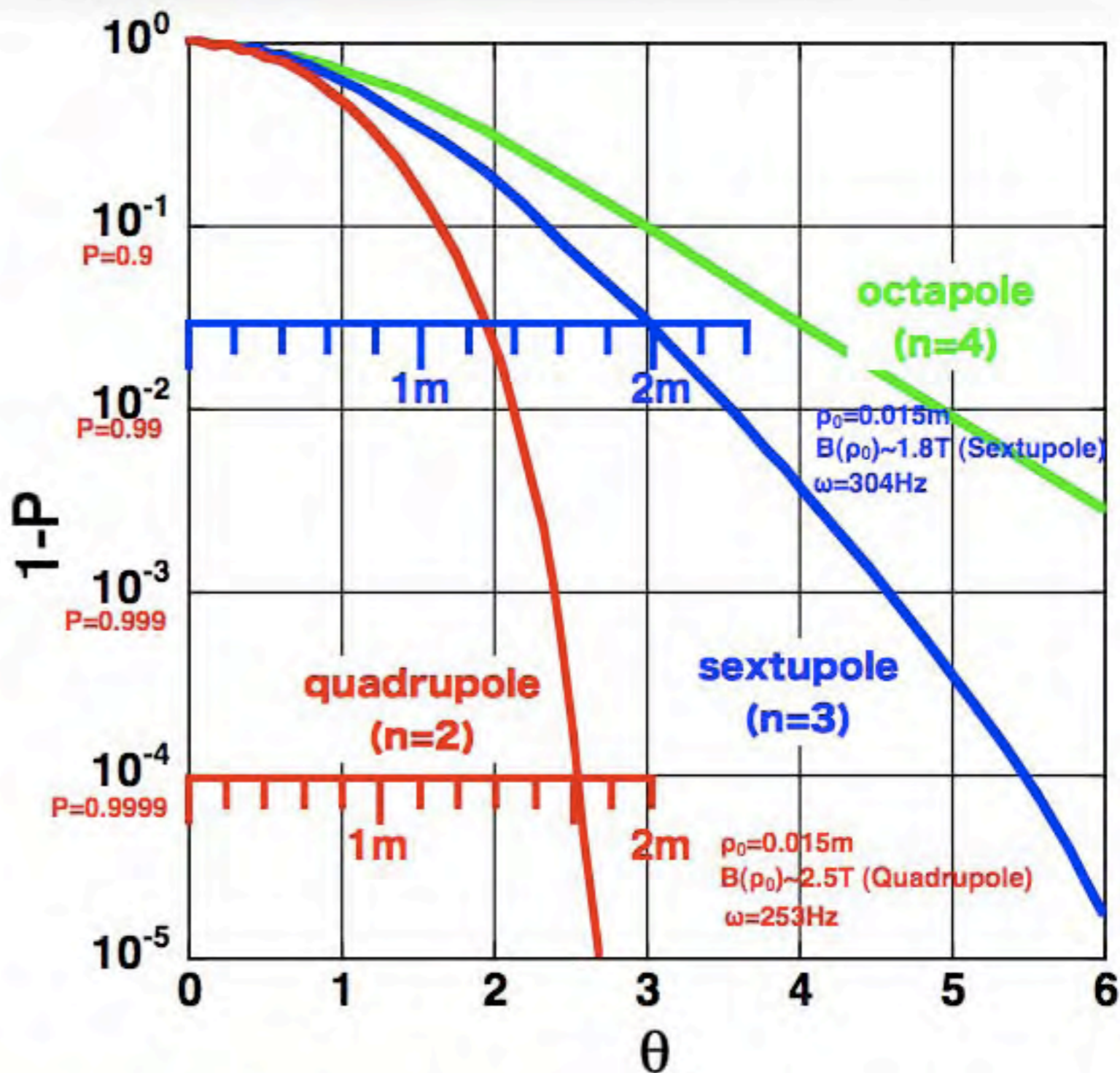
$$P > 0.9999 \Leftrightarrow \Delta P < 10^{-4},$$

for accurate determination of correlation terms in neutron β -decay
for extracting weak spin-flip processes



Polarization

$$\lambda = 20 \text{ \AA}$$



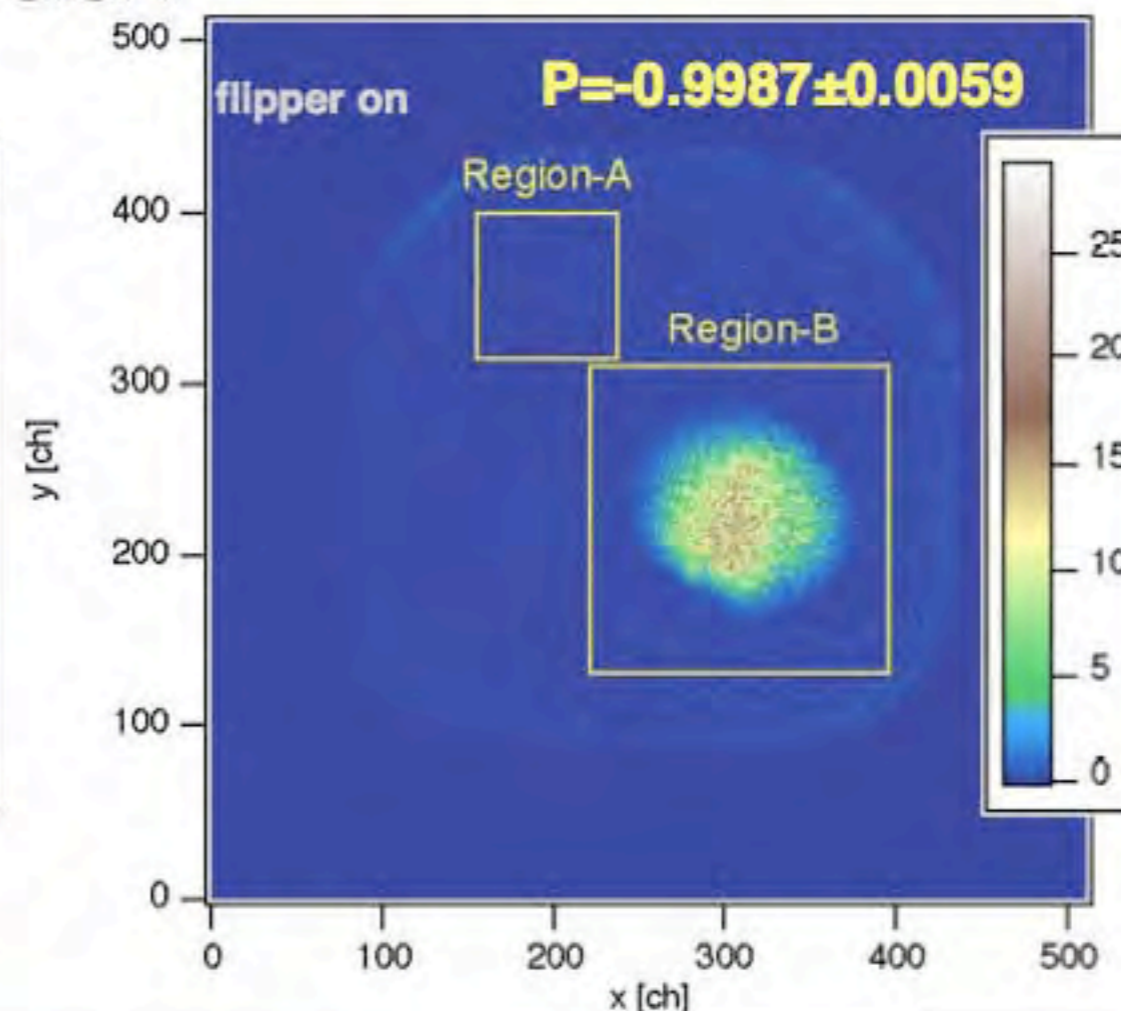
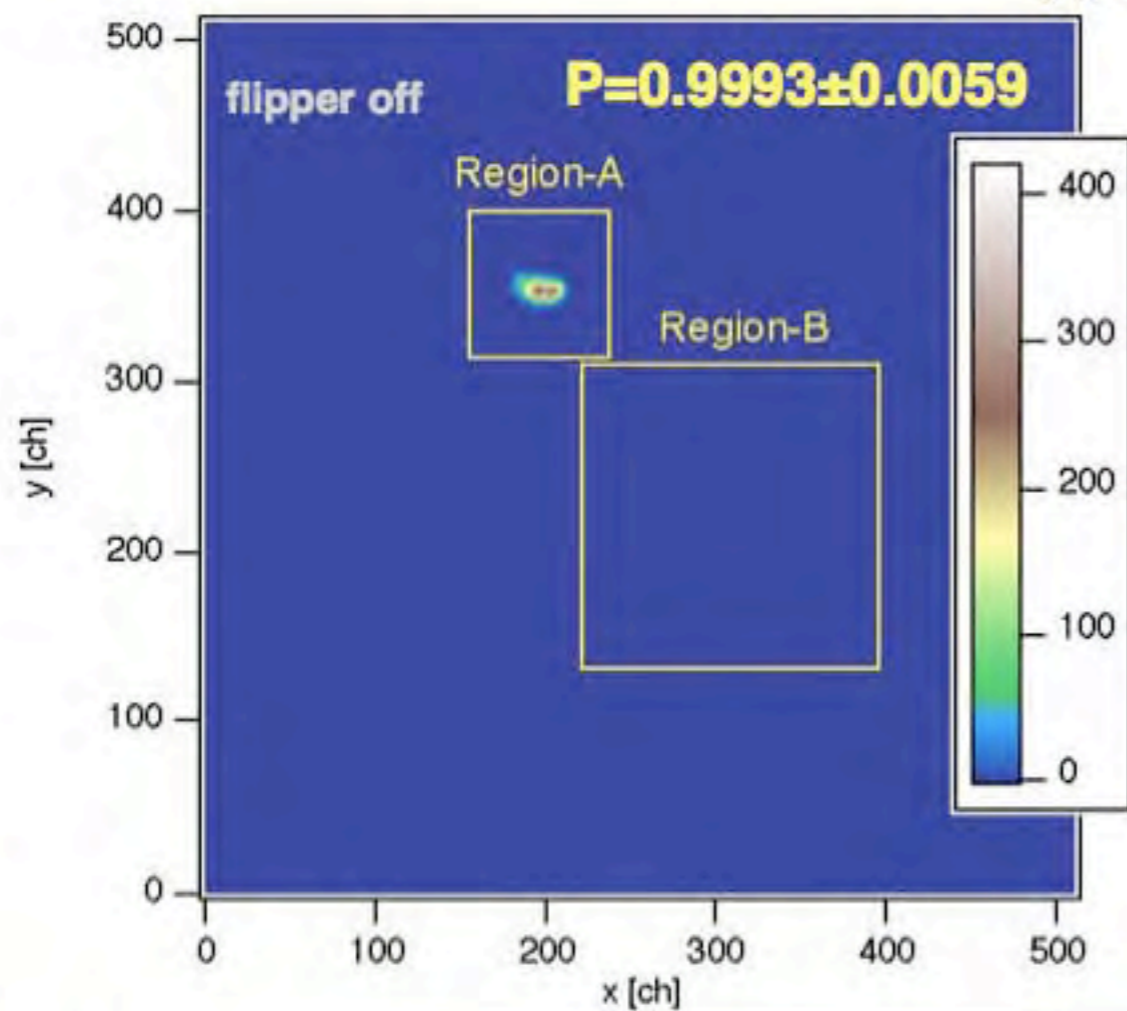
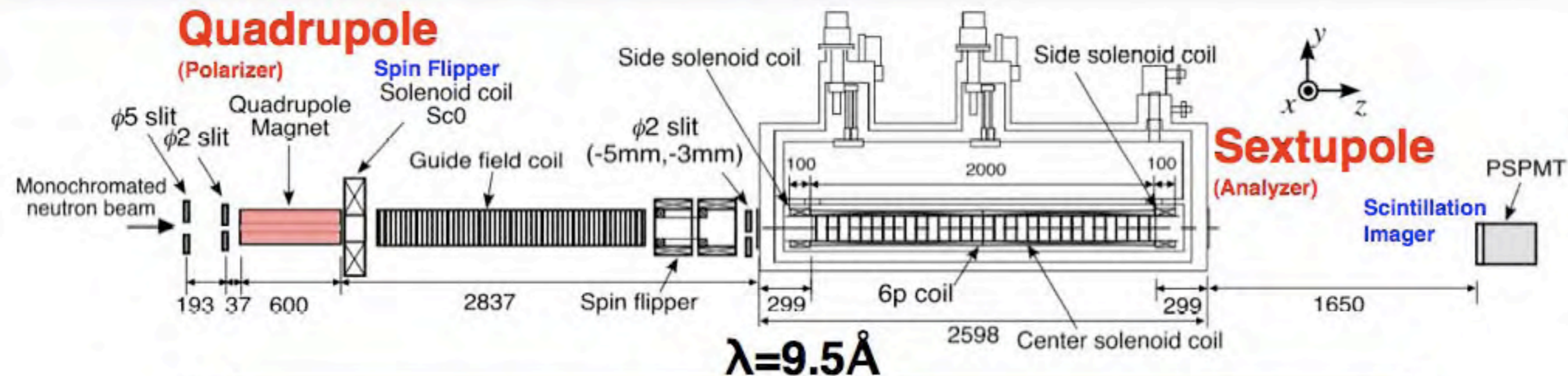
$$P > 0.9999 \Leftrightarrow \Delta P < 10^{-4},$$

for accurate determination of correlation terms in neutron β -decay
for extracting weak spin-flip processes



Quadrupole Magnetic Polarizer

T.Oku et al.

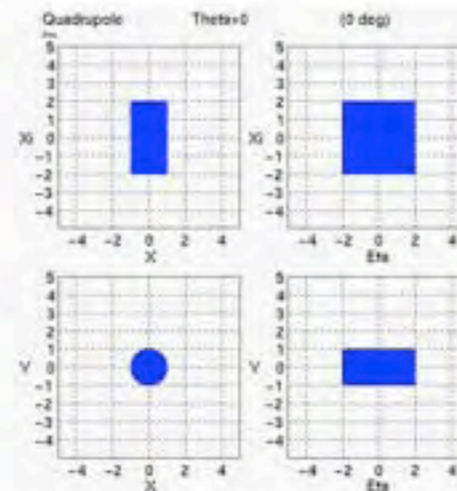
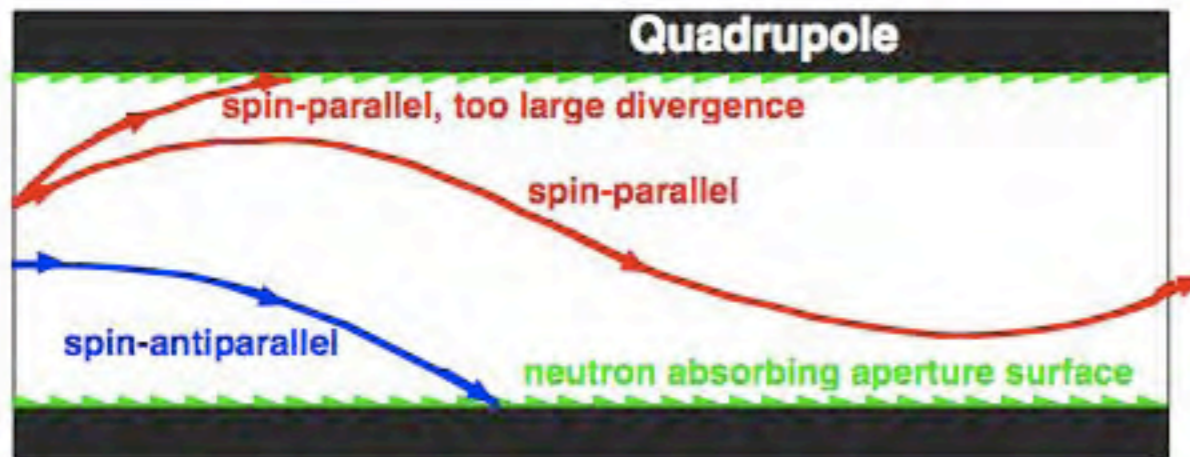
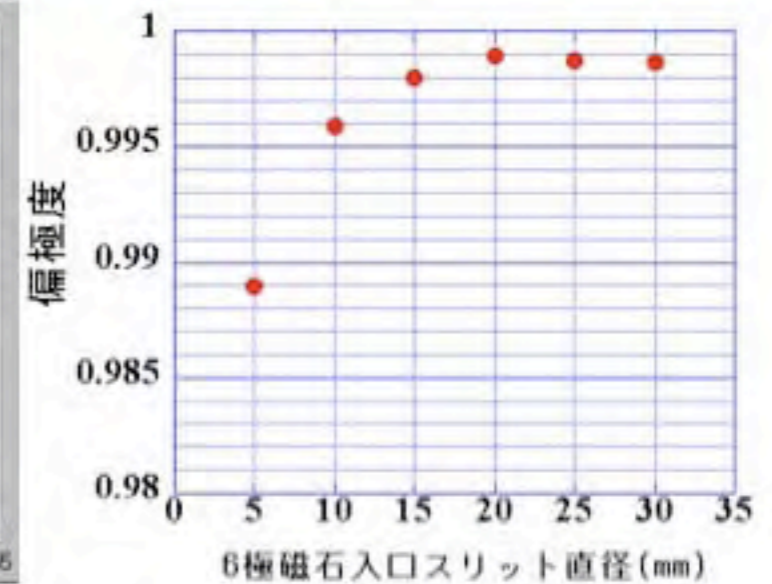
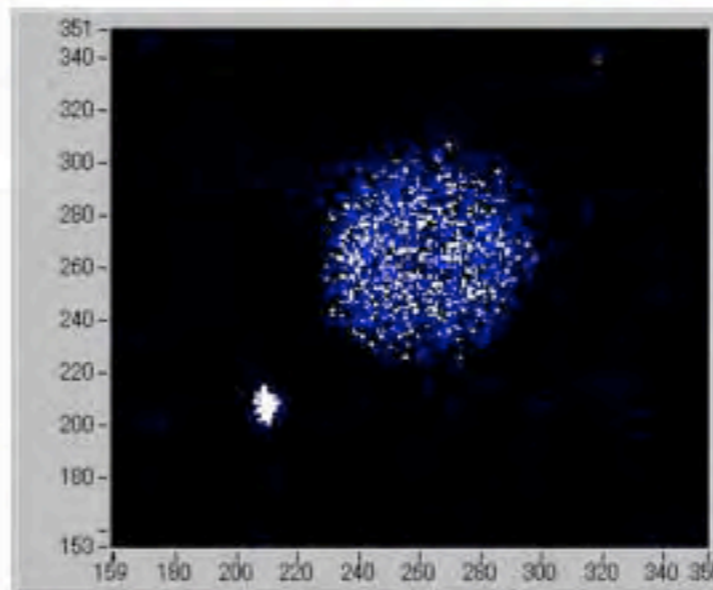


Highly Polarized Cold Neutron

using a Quadrupole Magnet

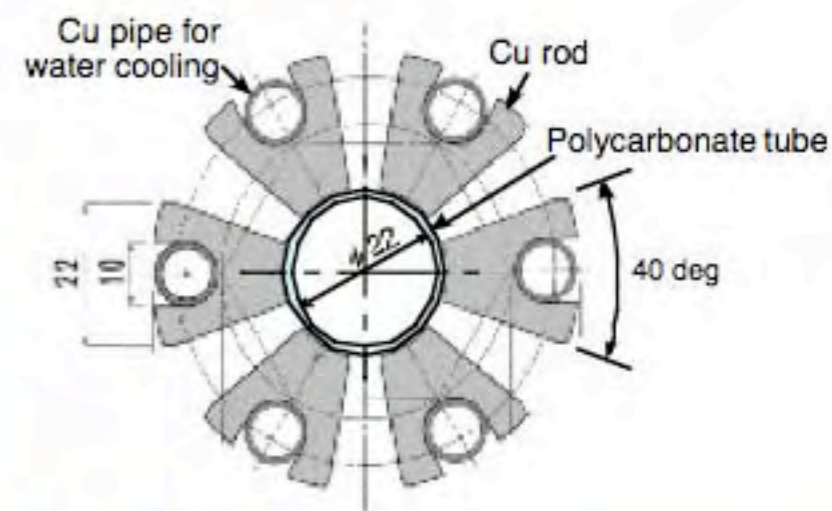
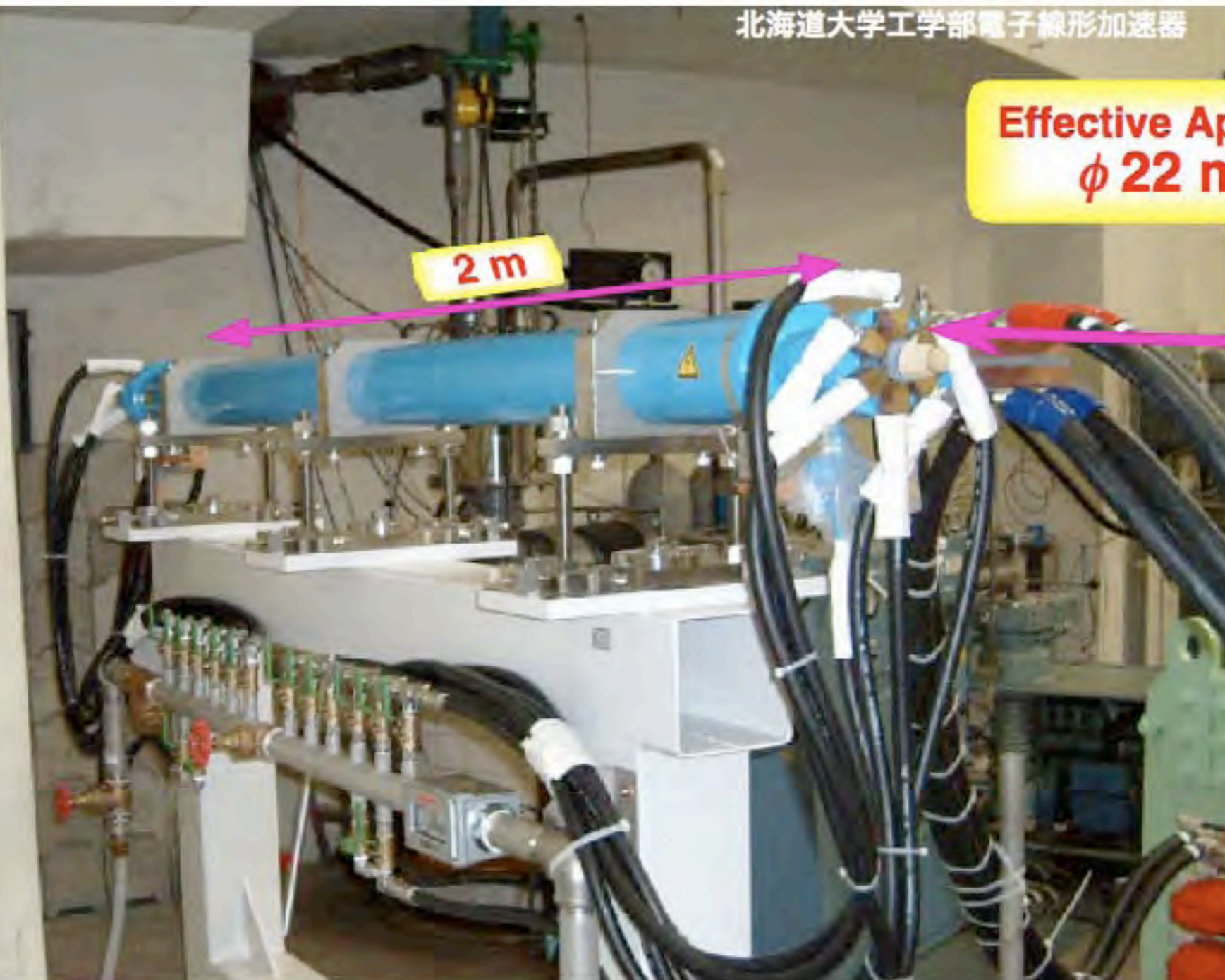


$$P=0.99887\pm 0.00033$$



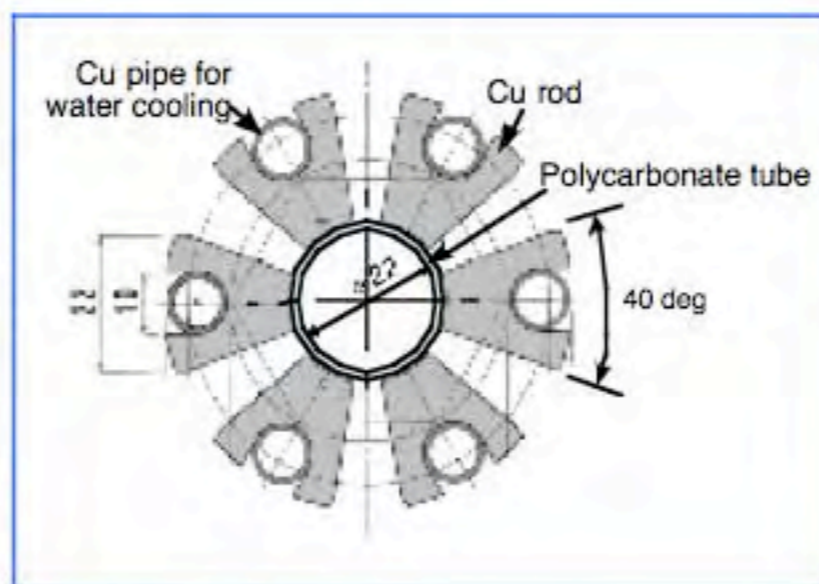
パルス六極電磁石

北海道大学工学部電子線形加速器

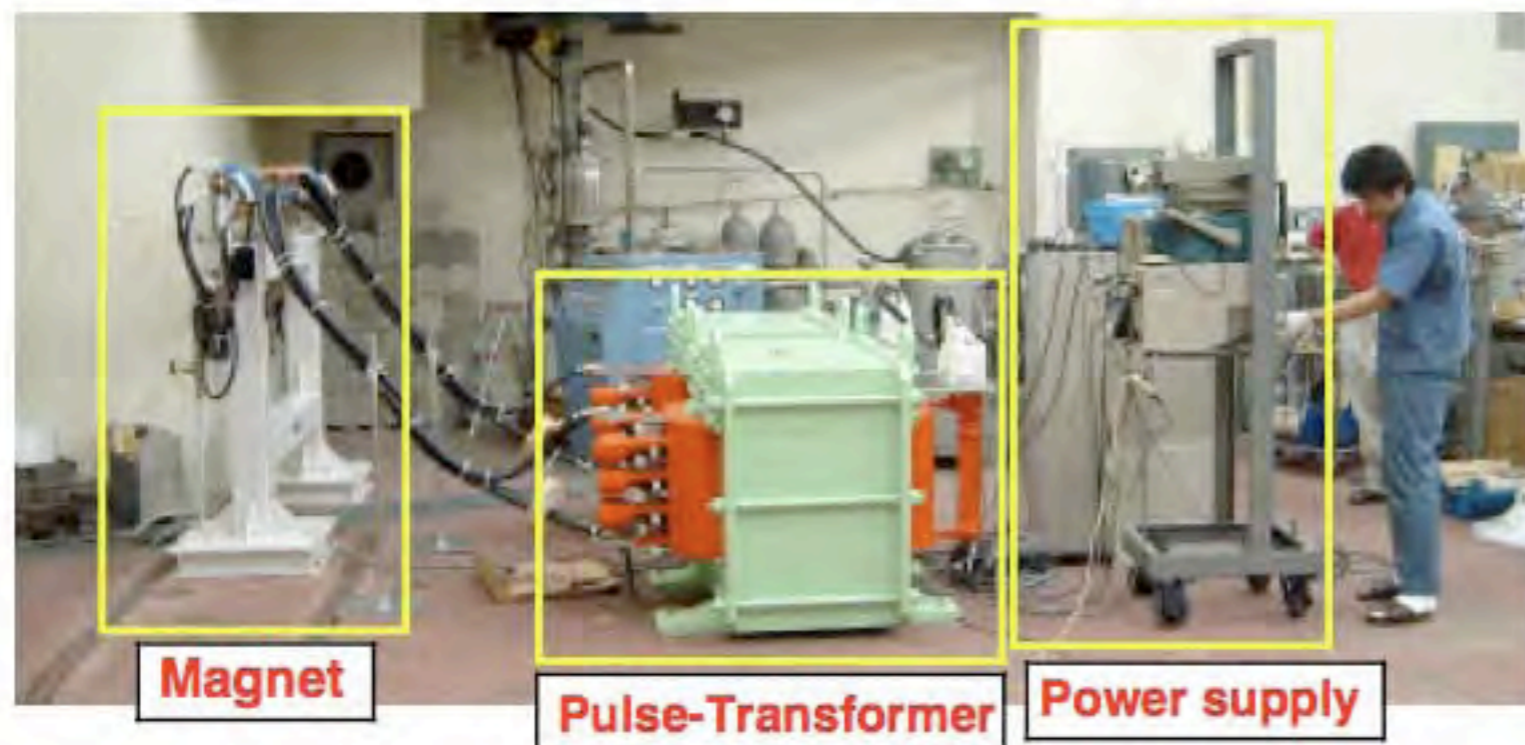
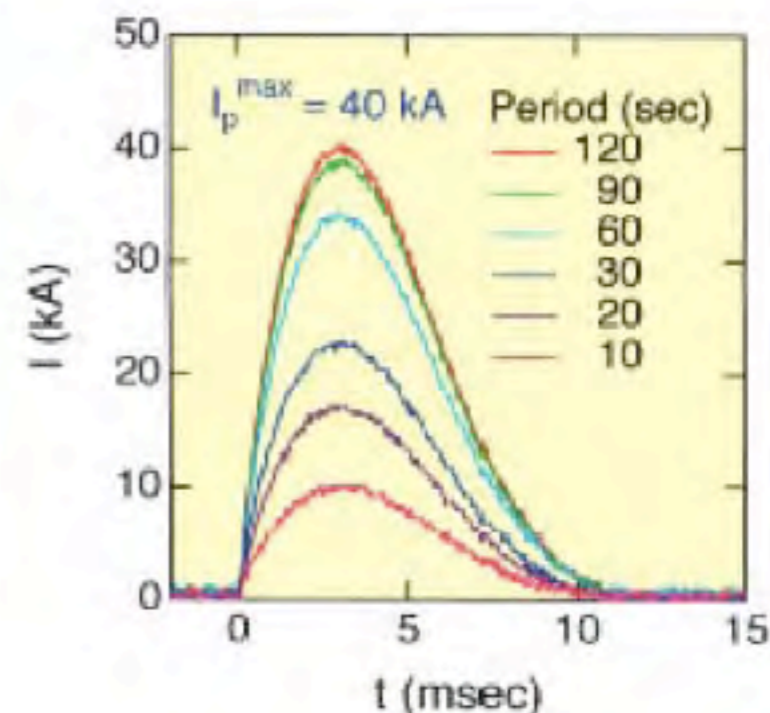


Magnetic Field Gradient : $16,000 \text{ Tm}^{-2}$

Sextupole Pulse Electromagnet

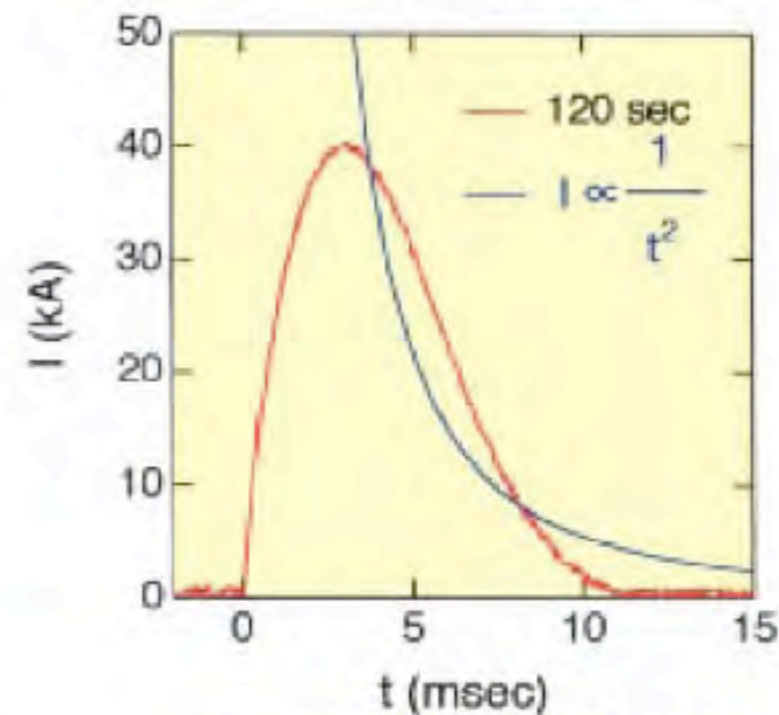


Sextupole Pulse Electro-Magnet



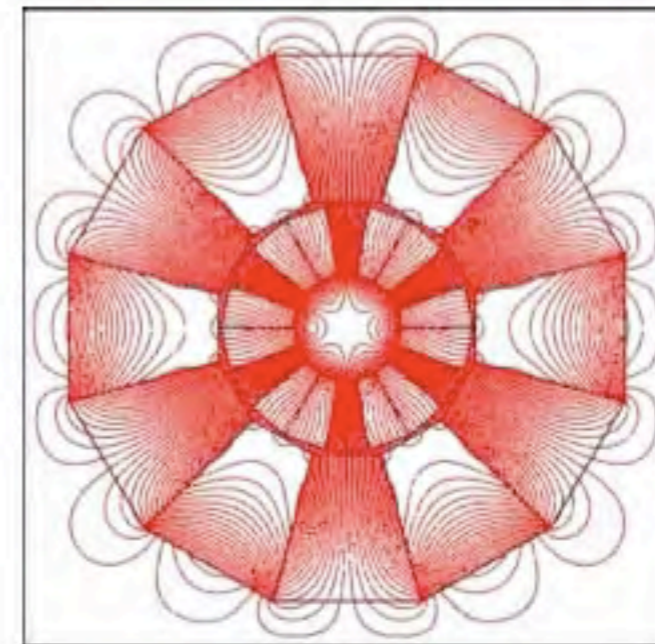
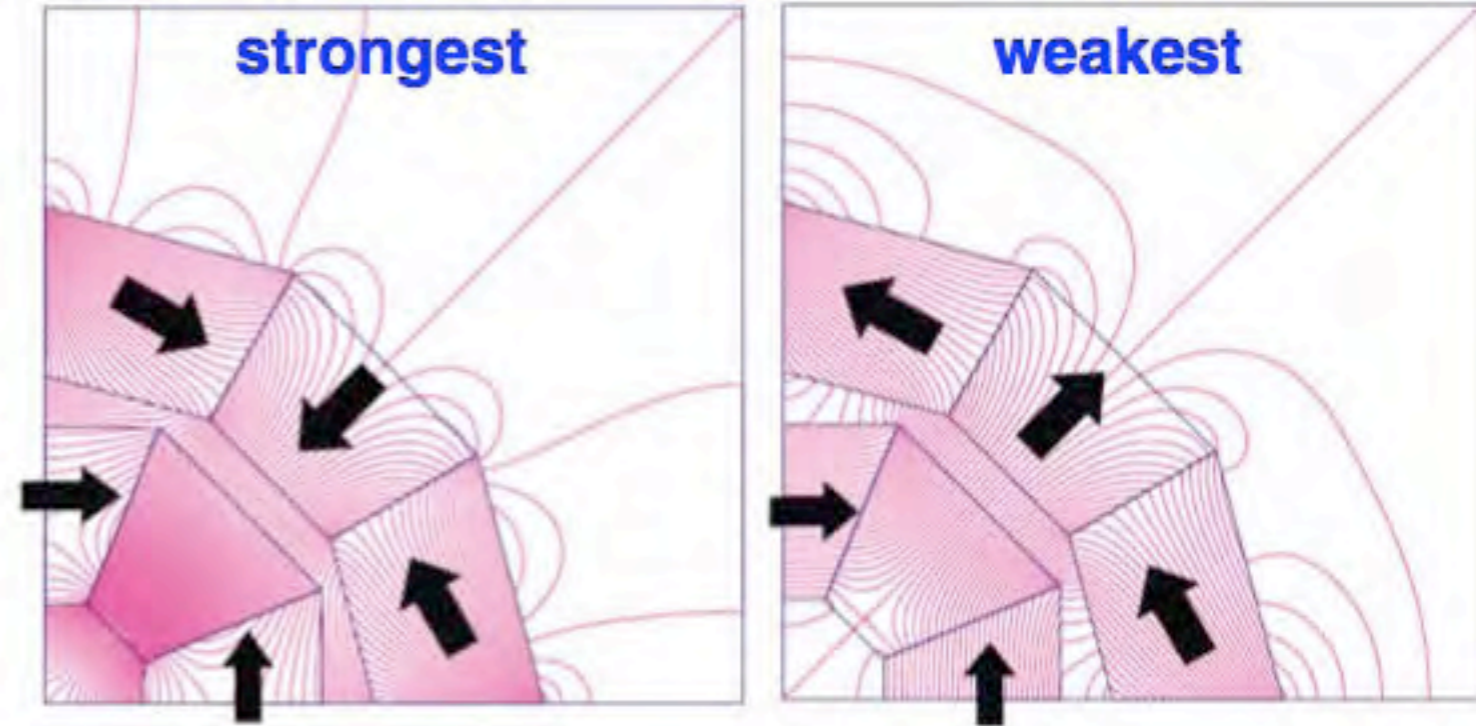
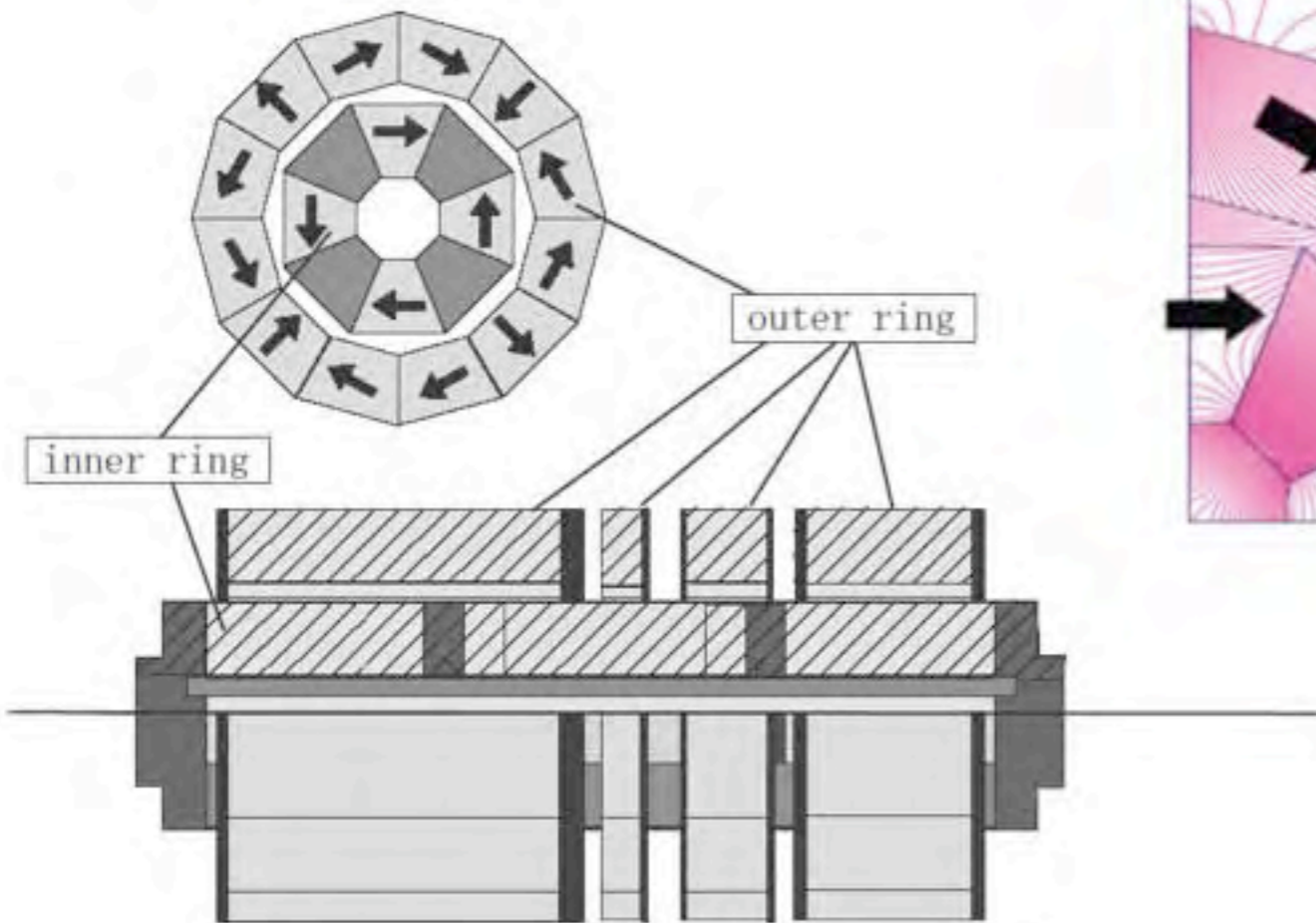
Whole system

We are now
Increasing repetition rate up to 25 Hz.
Shaping the pulse to focus pulsed neutrons.



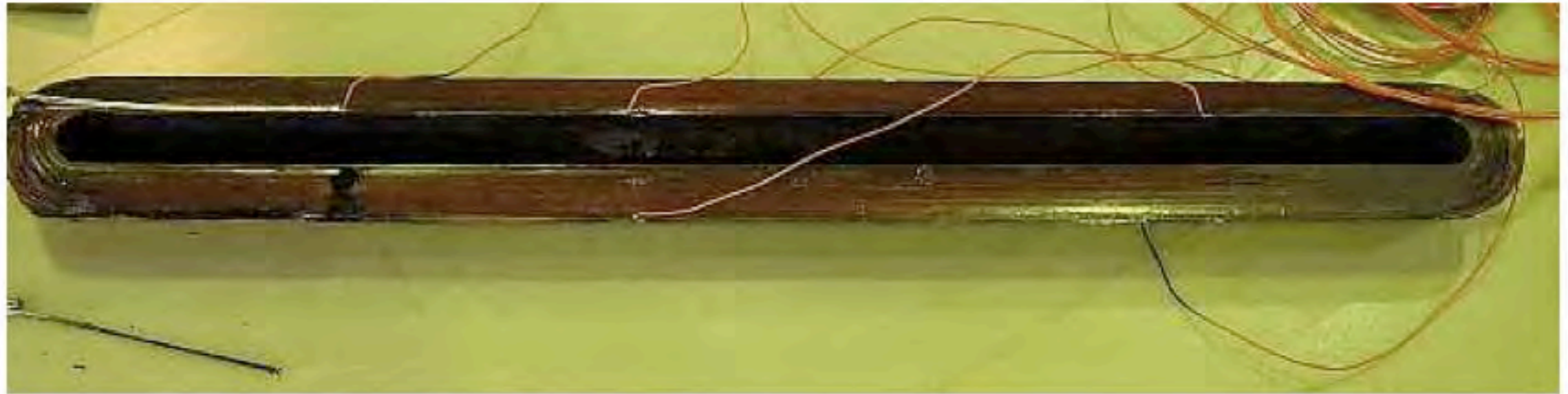
Current Pulse Shape

Rotating Coaxial Permanent Quadrupole



Challenges to Superconducting Magnet with High J_c Wires

Nb₃Sn



High Temperature Superconductors
Bi2212, YBCO

High- T_c Superconducting Bulk Magnet

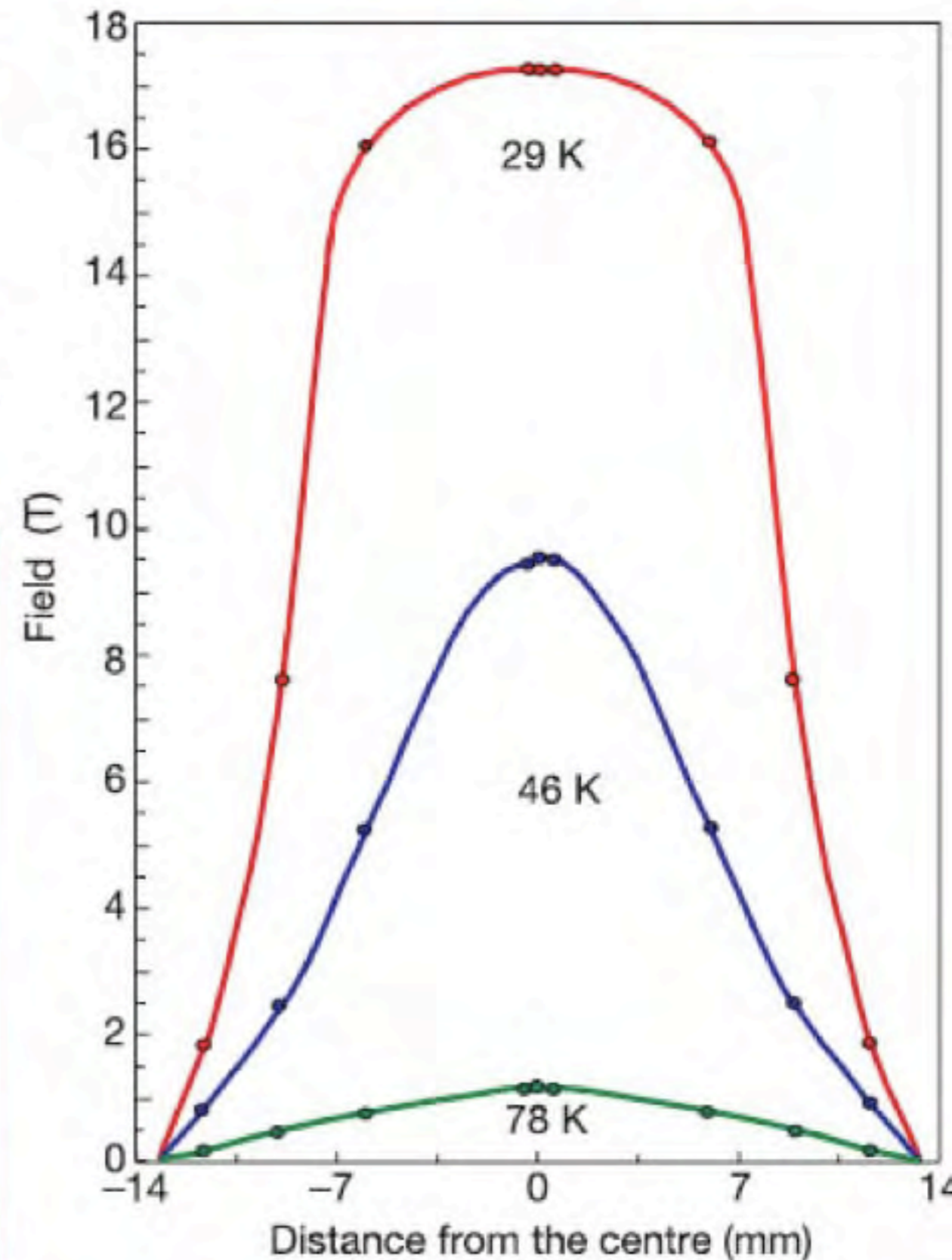
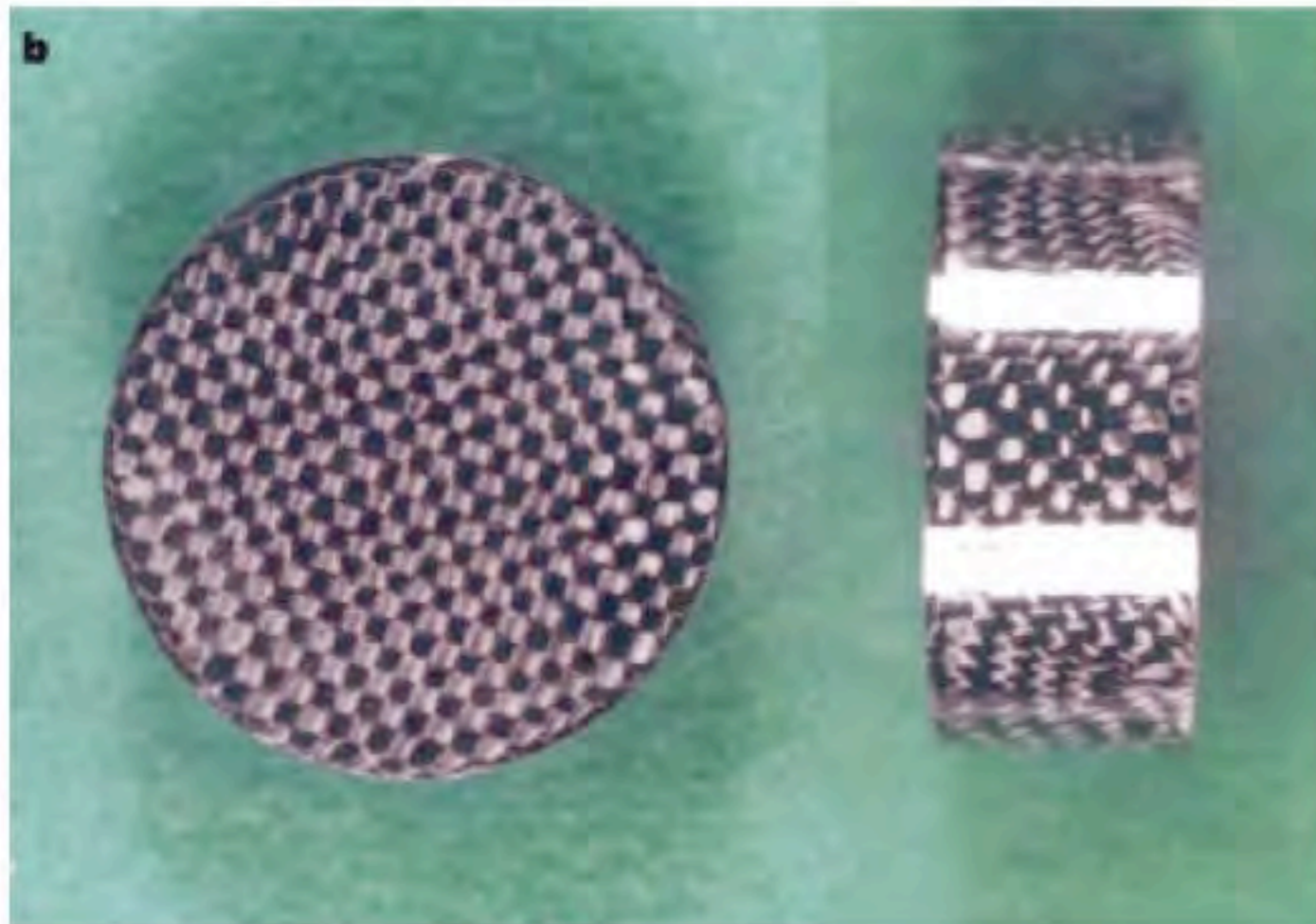
High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K

Masaru Tomita^{*†} & Masato Murakami^{*}

** Superconductivity Research Laboratory, Shibaaura 1-16-25, Minato-ku, Tokyo 105-0023, Japan*

† Railway Technical Research Institute, 2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8540, Japan

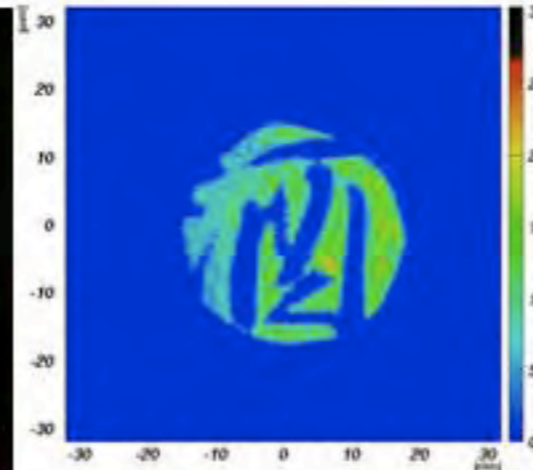
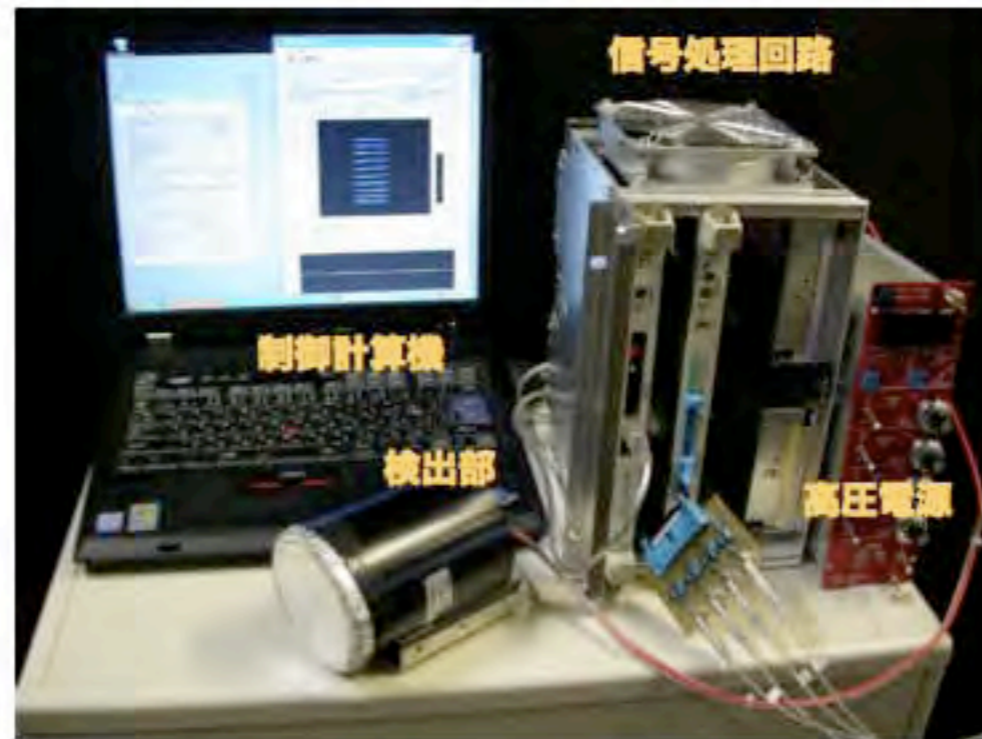
Nature 421 (2003) 517



1-1. 中性子光学基礎

(18) 中性子画像検出器

中性子シンチレータを用いたリアルタイム画像検出器です。中性子イメージングプレートに比べて極めて広いダイナミックレンジを持ち、ヘリウム3ガス検出器に比べて高計数率で動作します。



陽極抵抗分割読出型画像検出システム

1mm以下の位置分解能を手軽に実現できます。検出システムとして出来上がっているため、簡便に使用できます。



光直結読出型アンガーカメラ

シンチレーション光を直接マルチアノード光電子増倍管で検出するアンガー方式の画像検出器です。波長変換クロスファイバーを利用するのに比べて、発光量が少ないシンチレータ素材でも高計数率動作し、バックグラウンドに強い動作をします。



波長変換クロスファイバー読出

交差する波長変換ファイバーでシンチレーション光をマルチアノード光電子増倍管に導くタイプです。位置分解能450 μ mが達成されています。



物質研究のための中性子検出器

透過型検出器を実現する手段は見つかっていません

核反応を使って検出することになります



中性子は中性

運動エネルギーのほんの一部だけを確実に電子に与えることが困難。

低エネルギー

運動エネルギーを全部取り出しても、電子を動かすには足りない。



$$I(J^P) = \frac{1}{2} \left(\frac{1^+}{2^-} \right)$$

静止質量 (ref. PDG2004)

$$m = 939.56536 \pm 0.00008 \text{ MeV}$$

平均寿命

$$\tau = 885.7 \pm 0.8 \text{ s}$$

磁気双極子能率

$$\mu = -1.9130427 \pm 0.0000005 \mu_N$$

電気双極子能率

$$d < 0.63 \times 10^{-25} \text{ e cm (CL=90\%)}$$

自乗平均電荷半径

$$\langle r_n^2 \rangle = -0.1161 \pm 0.0022 \text{ fm}^2 (S=1.3)$$

電気分極率

$$\alpha = (11.6 \pm 1.5) \times 10^{-4} \text{ fm}^3$$

磁気分極率

$$\beta = (3.7 \pm 2.0) \times 10^{-4} \text{ fm}^3$$

電荷

$$q = (-0.4 \pm 1.1) \times 10^{-21} \text{ e}$$

平均中性子反中性子振動時定数

$$\tau_{nm}[\text{free}] > 8.6 \times 10^7 \text{ s (CL=90\%)}$$

$$\tau_{nm}[\text{bound}] > 1.3 \times 10^8 \text{ s (CL=90\%)}$$

崩壊モード

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e \quad 100\%$$

$$\lambda = g_A/g_V = -1.2695 \pm 0.0029 (S=2.0)$$

$$A = -0.1173 \pm 0.0013 (S=2.3)$$

$$B = 0.983 \pm 0.004$$

$$a = -0.103 \pm 0.004$$

$$\phi_{AV} = (180.08 \pm 0.10)^\circ$$

$$D = (-0.6 \pm 1.0) \times 10^{-3}$$

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e \gamma \quad < 6.9 \times 10^{-3}$$

$$n \rightarrow p \nu_e \bar{\nu}_e$$



物質研究のための中性子検出器

透過型検出器を実現する手段は見つかっていません

核反応を使って検出することになります

得られる情報は、中性子吸収反応が起こった

中性子は中性

運動エネルギーのほんの一部だけを確実に電子に与えることが困難。

位置と時間のみ

低エネルギー

運動エネルギーを全部取り出しても、電子を動かすには足りない。

$$f(\mu^+)=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\right)$$

停止電圧 $V_{stop} = 2000 \text{ V}$
 $m = 2.0135536107(5) \text{ MeV}$

平均電流 $I = 0.057 \text{ A}$

磁場中性子束 $\mu = 1.8130427 \pm 0.0000005 \mu$

電流中性子束 $\phi = 6.3 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \text{ (CL=90\%)}$

広域平均電流 $\langle \phi \rangle = 0.1151 \pm 0.0002 \text{ n/m}^2 \text{ (CL=1.0)}$

電流分極率 $P = 1.3 \pm 1.3 \times 10^{-4}$

電流分極率 $P = 2.7 \pm 2.0 \times 10^{-4}$

電流 $I = 0.4 \pm 1.1 \times 10^{-2} \text{ e}$

平均中性子検出率 $\gamma_{det}(\text{raw}) = 5.6 \times 10^{-4} \text{ (CL=90\%)}$
 $\gamma_{det}(\text{bound}) = 1.3 \times 10^{-4} \text{ (CL=90\%)}$

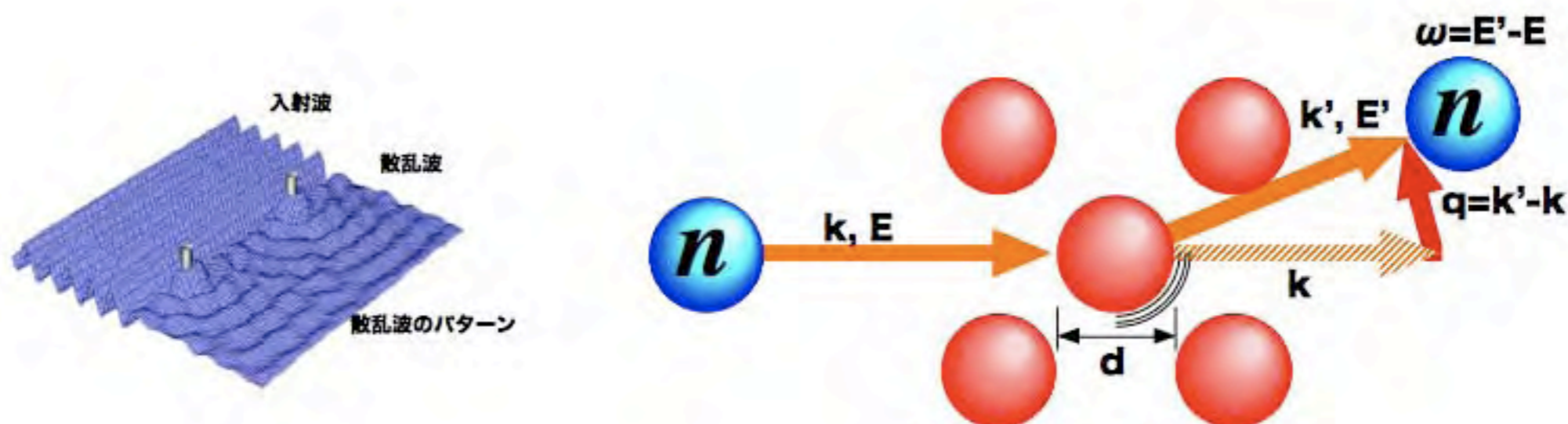
検出効率 $\epsilon = 100\%$
 $\lambda = 0.001 \pm 0.0002 \text{ (S=2.0)}$
 $\beta = 0.1173 \pm 0.0013 \text{ (S=2.3)}$
 $\beta = 0.90 \pm 0.04$
 $\alpha = 0.103 \pm 0.004$
 $\sigma_{av} = (180.0 \pm 10.0) \mu\text{b}$

$\sigma = 2.5 \pm 0.1 \times 10^{-2}$
 $\sigma_{\text{raw}} = 5.7 \times 10^{-4}$
 $\sigma_{\text{bound}} = 1.3 \times 10^{-4}$



物質研究のための中性子検出器

ほとんど全ての中性子がTrue Signalです。



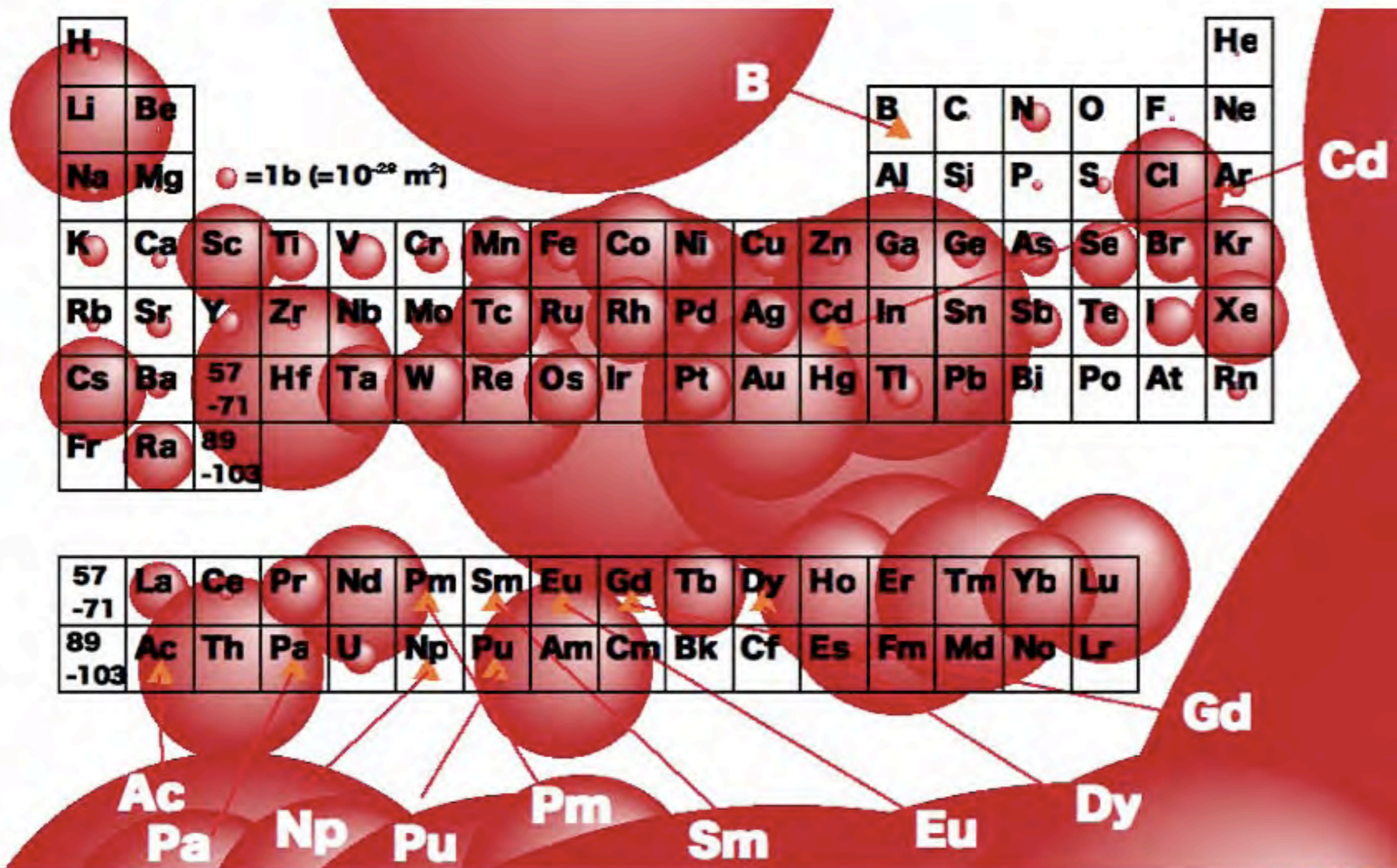
数え落しを嫌います



物質研究のための中性子検出器

中性子を吸収すると、大抵は γ 線を放出します。

図は、熱中性子($T=25\text{meV}$)に対する吸収断面積です。吸収断面積は $1/v$ に比例します。



物質研究のための中性子検出器

中性子を吸収すると、大抵は γ 線を放出します。

図は、熱中性子($T=25\text{meV}$)に対する吸収断面積です。吸収断面積は $1/v$ に比例します。

中性子ビームの周りは γ 線だらけです。

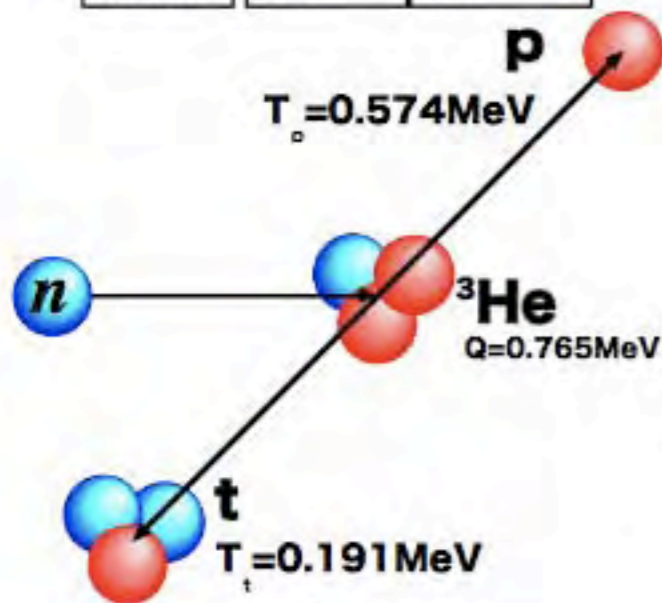
γ 線に鈍感なものが良い



中性子検出に使える核反応

① $n+{}^3\text{He}\rightarrow p+t$

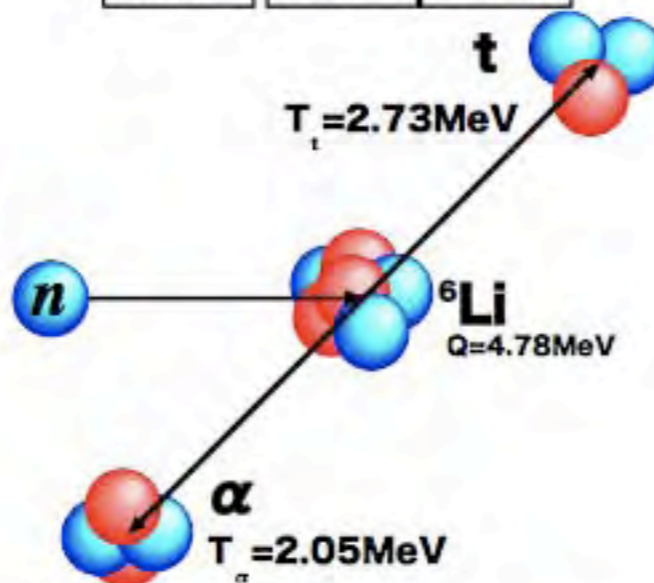
He 2	³He	⁴He
0.007b	0.000138% 5333b	99.999862 % 0.0b



$\sigma = 5333\text{b}$

② $n+{}^6\text{Li}\rightarrow t+\alpha$

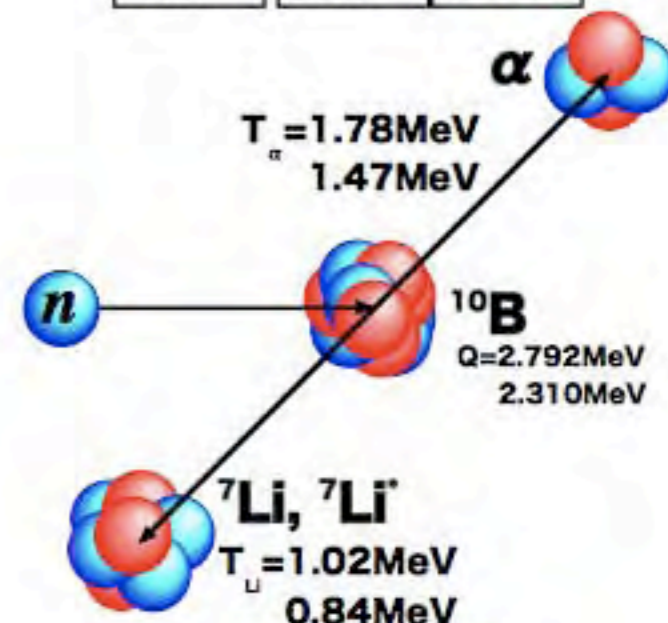
Li 3	⁶Li	⁷Li
70.5b	7.5% 940b	92.5% 0.0454b



$\sigma = 940\text{b}$

③ $n+{}^{10}\text{B}\rightarrow\alpha+{}^7\text{Li}$

B 5	¹⁰B	¹¹B
767b	20.0% 3837b	80.0% 0.0055b



$\sigma = 3837\text{b}$

Single Wire Proportional Chamber
 + resistance-division readout
 Multi Wire Proportional Chamber

LiF/ZnS
 Lithium Glass Scintillator

BF_3 Scintillator

- 長期安定性の実績
- 低い γ 線感度
- × 遅い
- × 位置分解能が悪い

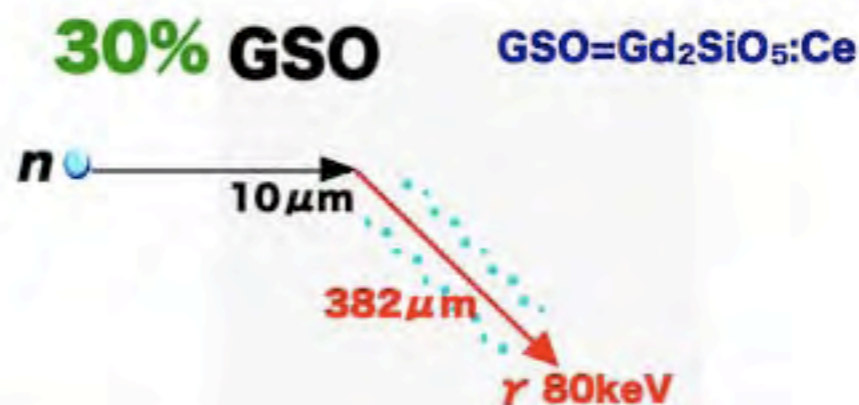
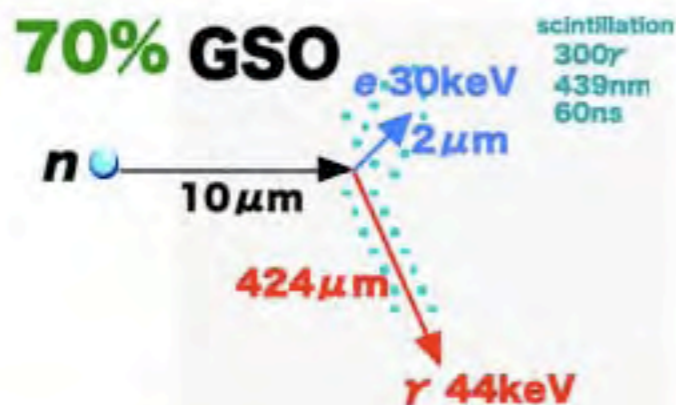
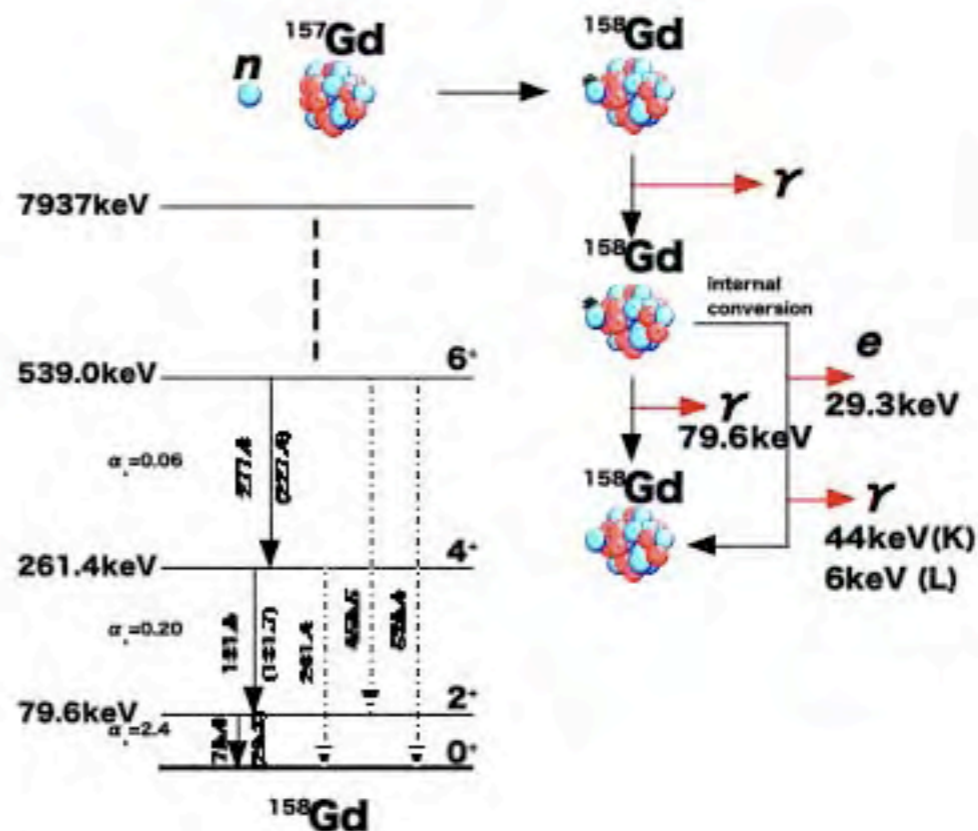
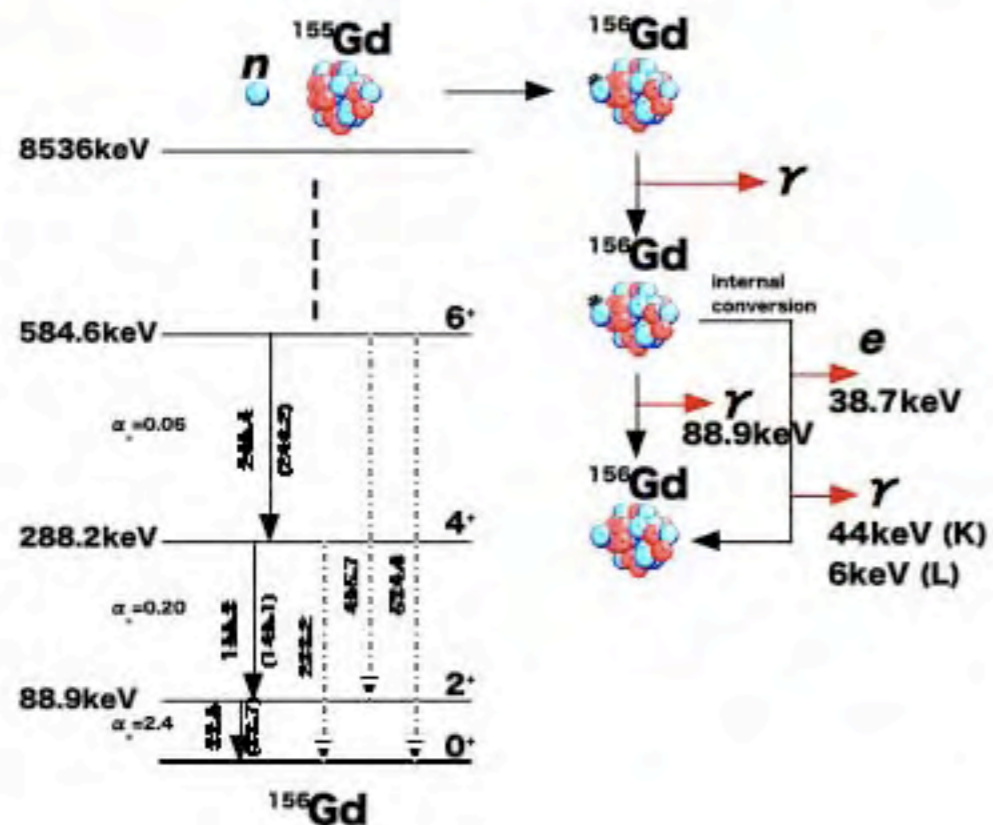
- × γ 線感度
- × 遅い?



中性子検出に使える核反応

④ n+Gd

Gd	¹⁵² Gd	¹⁵⁴ Gd	¹⁵⁵ Gd	¹⁵⁶ Gd	¹⁵⁷ Gd	¹⁵⁸ Gd	¹⁶⁰ Gd
64							
	0.2%	2.1%	14.8%	20.6%	15.7%	24.8%	21.8%
	735b	85b	60900b	1.5b	254000b	2.2b	0.77b



中性子検出器の開発の方向性

ガス(^3He)

高計数率化 → MSGCなど

位置分解能 → 多チャンネル化

シンチレータ

γ 線感度低減 → 材料探索

光量増大

高計数率化 → 多チャンネル化

位置分解能 → マルチアノード

システム化

多チャンネル信号処理

システム化

多ユニットのシステム化

Host	Dopant (conc. mol%)	Density ρ (g/cm ³)	ρZ_{eff}^4 ($\times 10^{-6}$)	Abs. Length @ $\lambda=1.8\text{\AA}$ (mm)	Light Yield (photons/neutron)	Light Yield (photons/MeV γ)	α/β Ratio	λ_{em} (nm)	τ (ns)
^6Li -glass	Ce	2.5		0.52	~6,000	~4,000	0.3	395	75
^6LiI	Eu	4.1	31	0.54	50,000	12,000	0.87	470	1400
$^6\text{LiF/ZnS}$	Ag	2.6	1.2	0.8	160,000	75,000	0.44	450	>1000
LiBaF_3	Ce, K	5.3	35		3,500	5,000	0.14	190-330	1/34/2100
LiBaF_3	Ce, Rb	5.3	35		3,600	4,500	0.17	190-330	1/34/2400
$^6\text{Li}_6^{\text{dop}}\text{Gd}(\text{}^{11}\text{BO}_3)_3$	Ce	3.5	25	0.35	40,000	25,000	0.32	385, 415	200/800
$^6\text{Li}_6^{\text{dop}}\text{Gd}(\text{}^{11}\text{BO}_3)_3 + \text{Y}_2\text{SiO}_5$	Ce Ce	3.9		1	40,000 -	30,000		420 420	200/800 70
$\text{Cs}_2^6\text{LiYCl}_6$	Ce (0.1)	3.3		3.2	70,000 -	22,000 700	0.66	380 255-470	~1000 3
$\text{Cs}_2^6\text{LiYBr}_6$	Ce (1)	4.1		3.7	88,000	23,000	0.76	389,423	89/2500

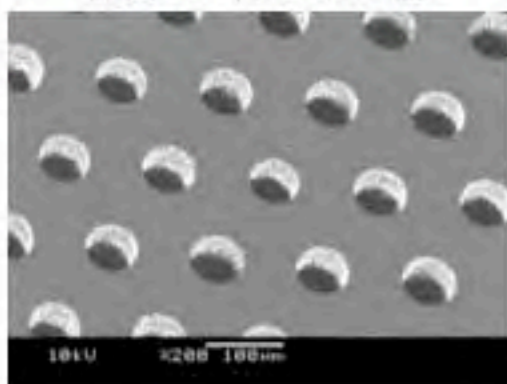
C.W.E van Eijk, Nucl. Instrum. Methods A529 (2004) 260



中性子GEM検出器

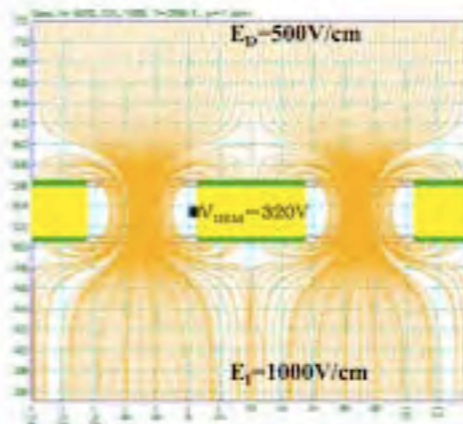
S.Uno (KEK)

両面フレキシブル基板

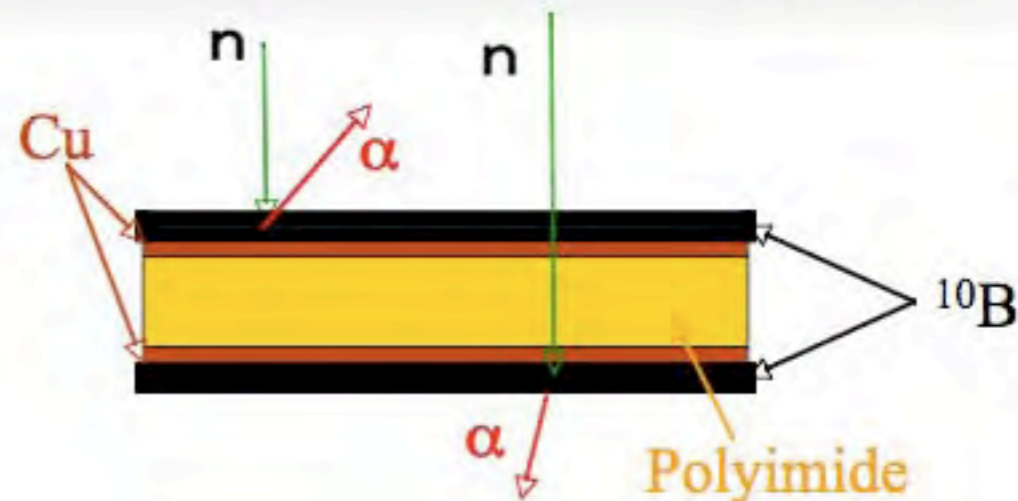


Hole diameter 70 μm
 Hole pitch 140 μm
 Thickness 50 μm
 Cu thickness 5 μm

Electric field



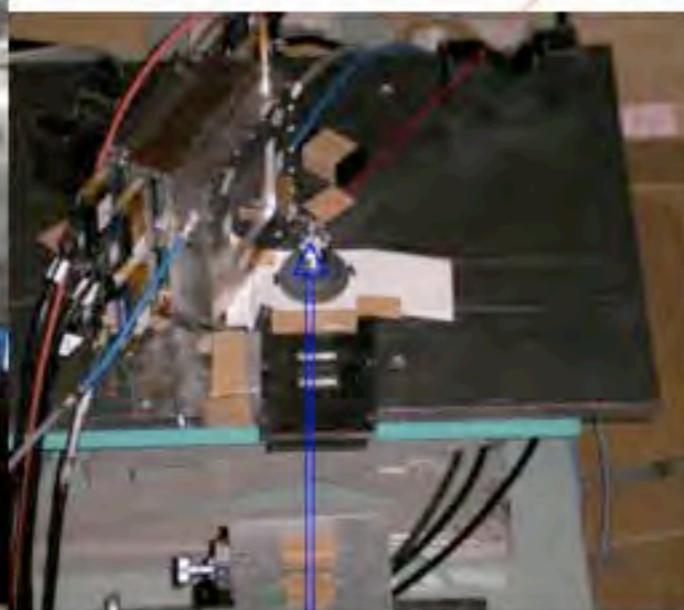
Developed by F.Sauli (CERN) in 1997.
 NIMA 386(1997)531



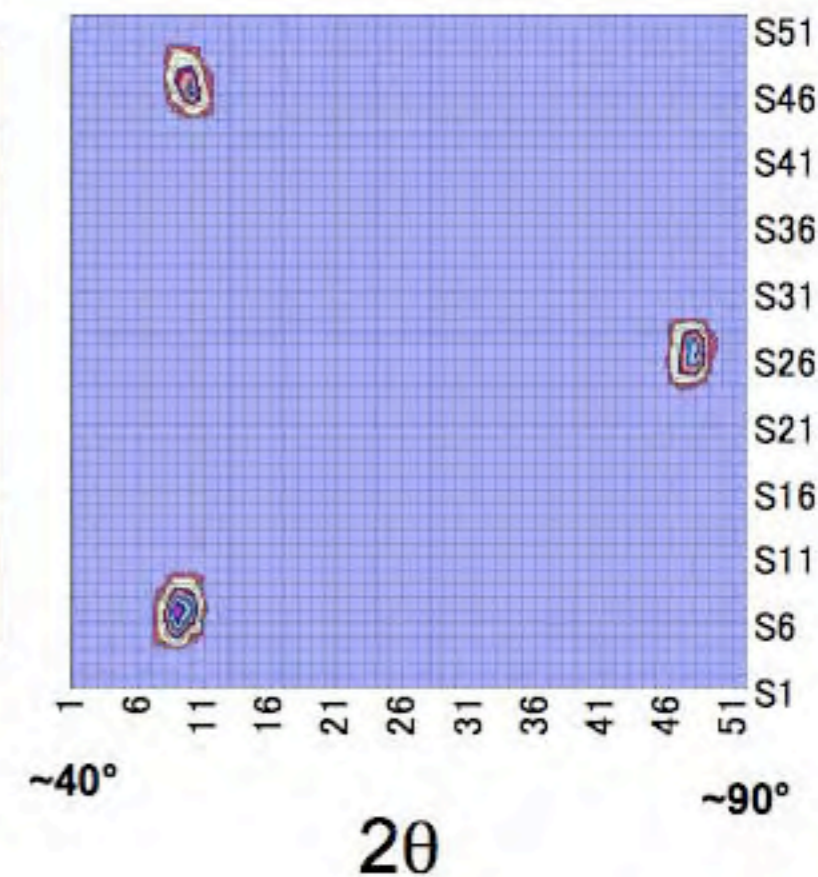
単結晶 K_2SeO_4

■ = 2.2 Å

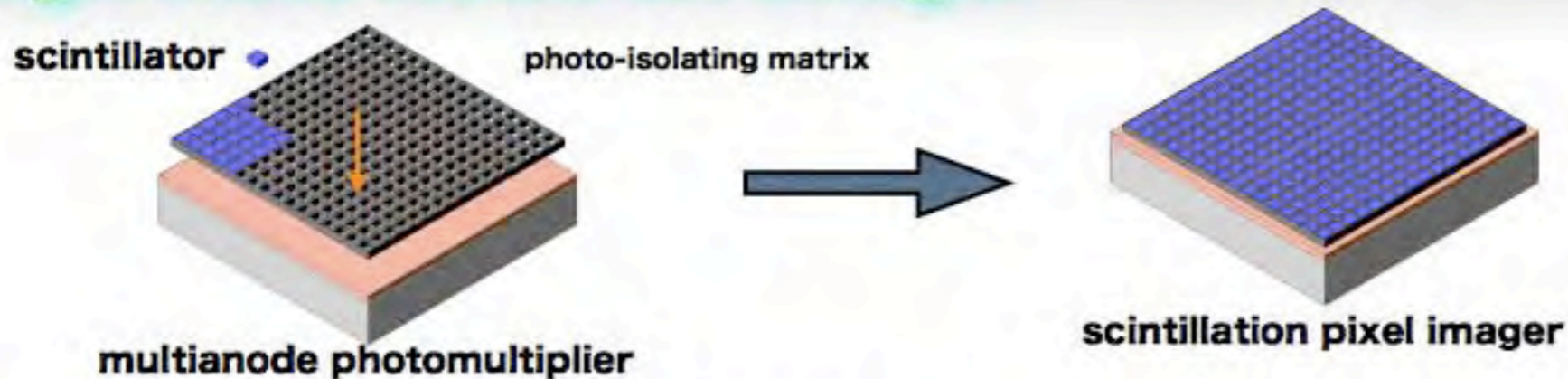
Sample



Neutron Beam



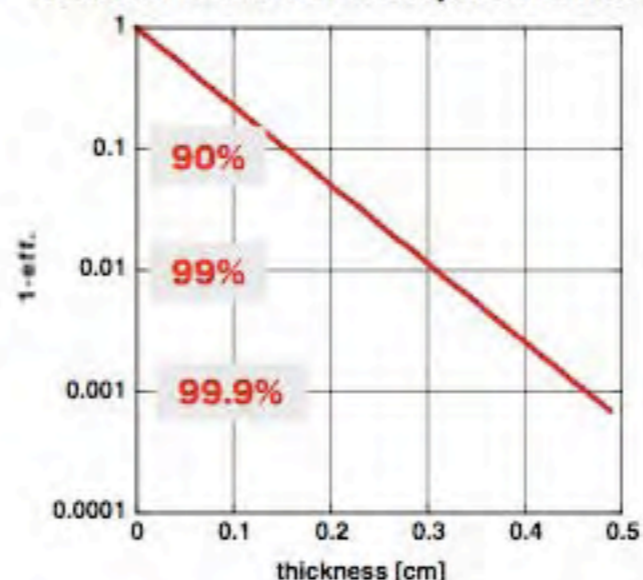
High Rate Neutron Imager



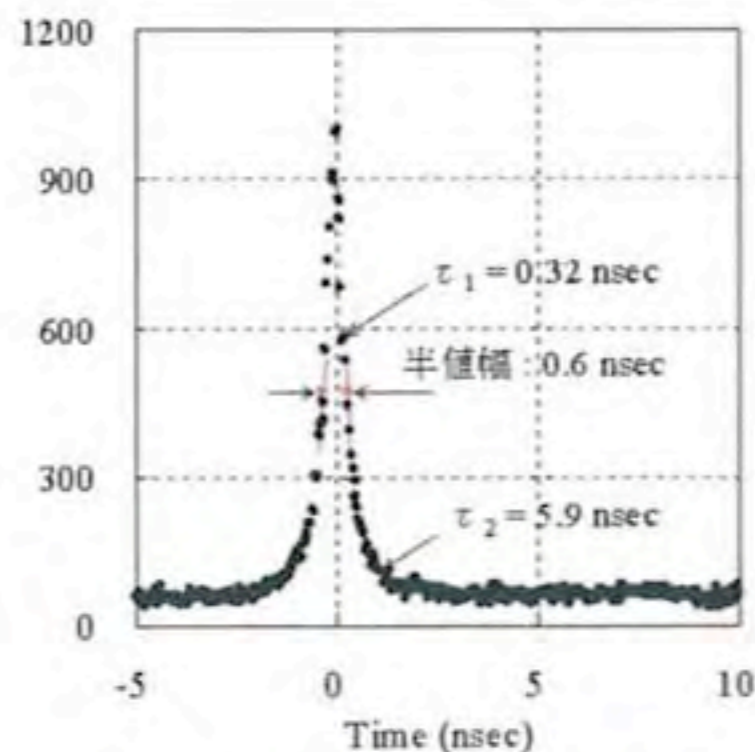
Li₂B₄O₇:Cu single crystal



Thermal Neutron Absorption Efficiency



transparent in $160 \leq \lambda \leq 3600$ nm



pulse width ~ 0.6-0.75 ns

	λ_{em} [nm]	Photon Yield		decay [ns]	ρZ_{eff}^4
		n	γ		
LBO:Cu	380	100	200	2	7×10^3
Li Glass	395	6000	4000	75	1.2×10^6
LiZnS:Ag	450	160000	75000	1000	1.2×10^6

light yield ~ 50-100 photon/neutron

fast but faint

Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)



応用中性子光学

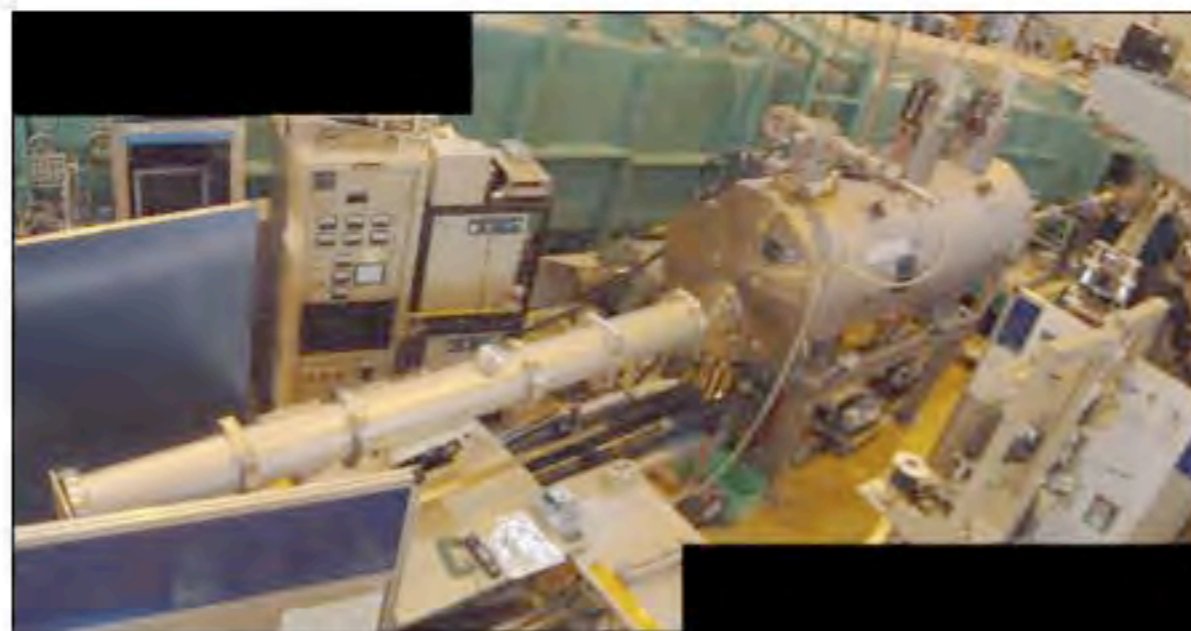
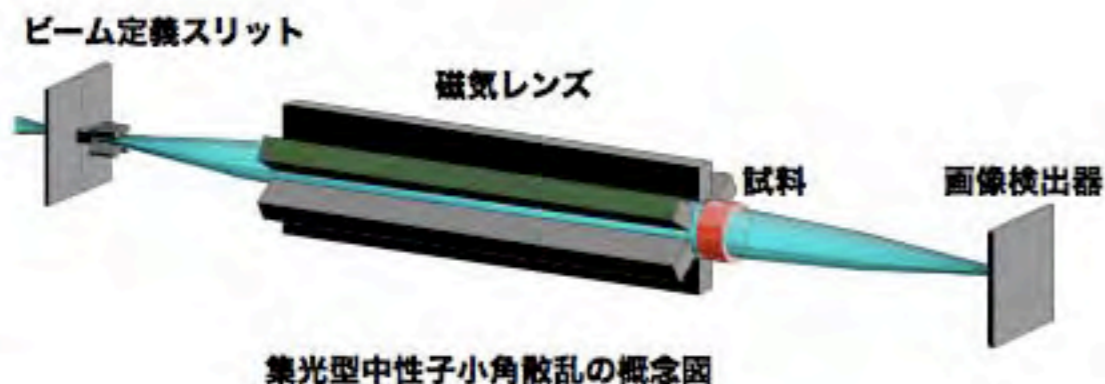


1-2. 応用中性子光学

集光型中性子小角散乱

中性子小角散乱は、概ね5度以下の小さな角度範囲に散乱される中性子を観測する実験手法です。小さな移行運動量における散乱強度を測定することに重点が置かれており、高分子、蛋白分子を含む一般の物質中における1nm-1 μ m程度の中間的な空間スケールを持つ秩序や微粒子の構造を調べるために使用されます。

対象物の大きさが大きくなると、より小さな角度の散乱を観測する必要があります。その散乱角は中性子ビームが持っている発散に比べても小さくなるため、従来は平行度の高いビーム成分以外を除去して使用していました。これに対して、レンズを用いて発散ビームを検出器面に対して集光する方法は集光型中性子小角散乱と呼ばれます。集光型中性子小角散乱では、散乱されなかった中性子は検出器面上に鋭い点像を結ぶため、僅かな角度の散乱でも感度よく測定できるようになります。焦点面上でのビーム像が鋭いので、中性子検出器の解像度も同時に向上させる必要があります。



磁気レンズと前述のシンチレーション画像検出システムを用いた集光型中性子小角散乱において、従来に比べておよそ1/10の小さな散乱角での観測が可能になりました。同じことを従来法で達成しようとする、約100倍の出力の原子炉が必要になります。

集光により中性子利用効率は約100倍に増加



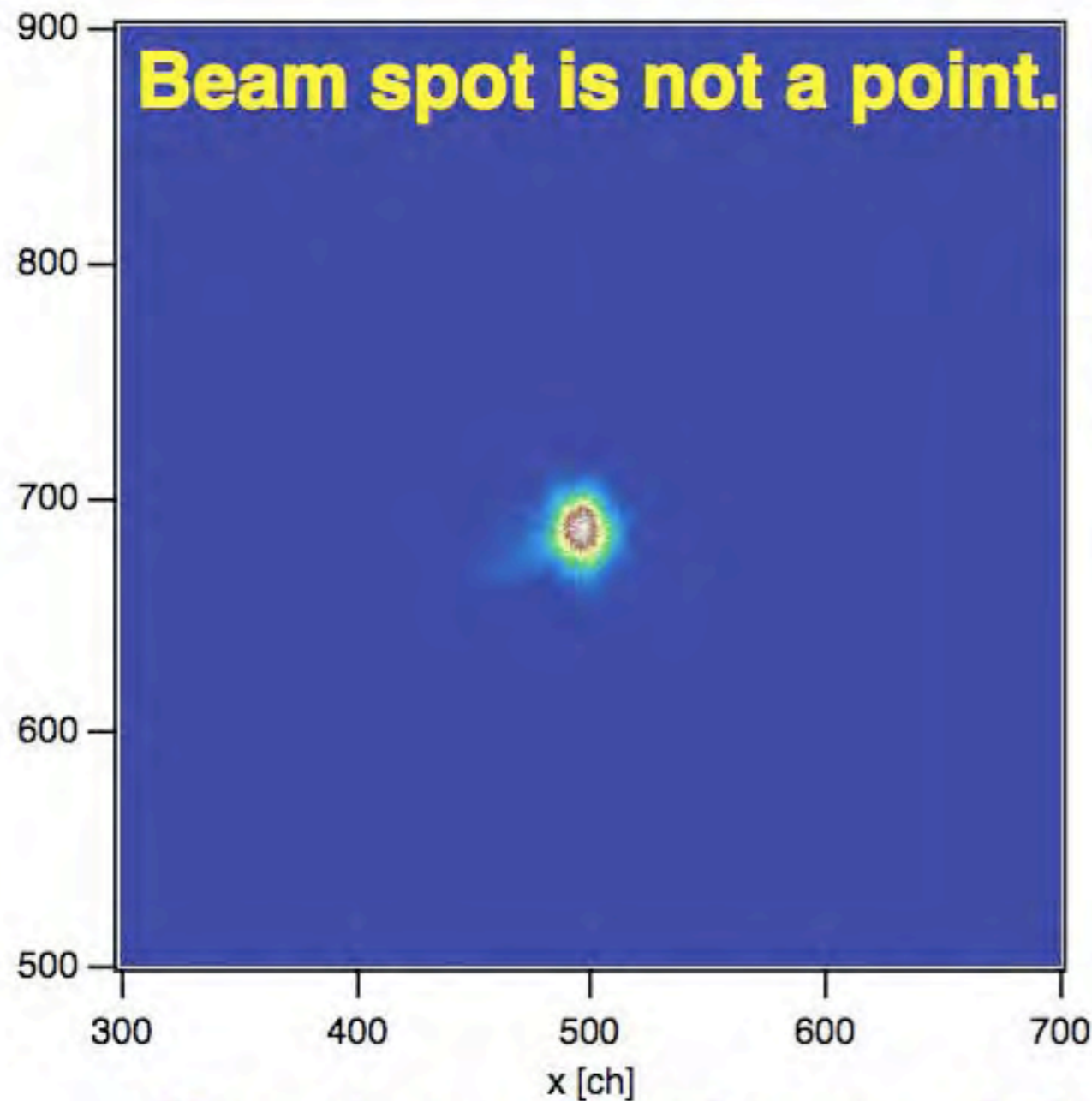
Extending q-region of F-SANS with Beam Profile Decomposition

Beam spot is not a point.

We measure
blurred image and point-spread function

$$I(x,y) = \int I(q(X,Y)) f(X,Y) dXdY$$

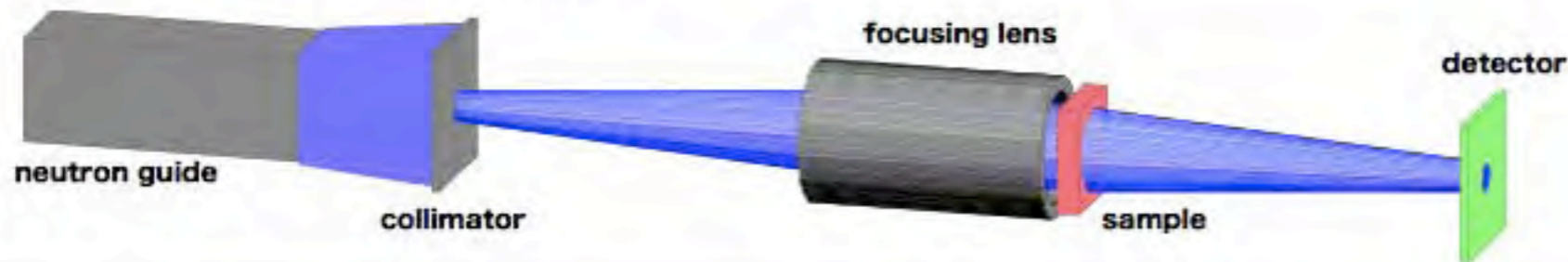
and we derive the original image.



**If we have fine image detectors accepting direct beam,
we can go smaller q-region by observing the change of
the smeared direct beam image.**

1-2. 応用中性子光学

Focusing to Detector (F-SANS)



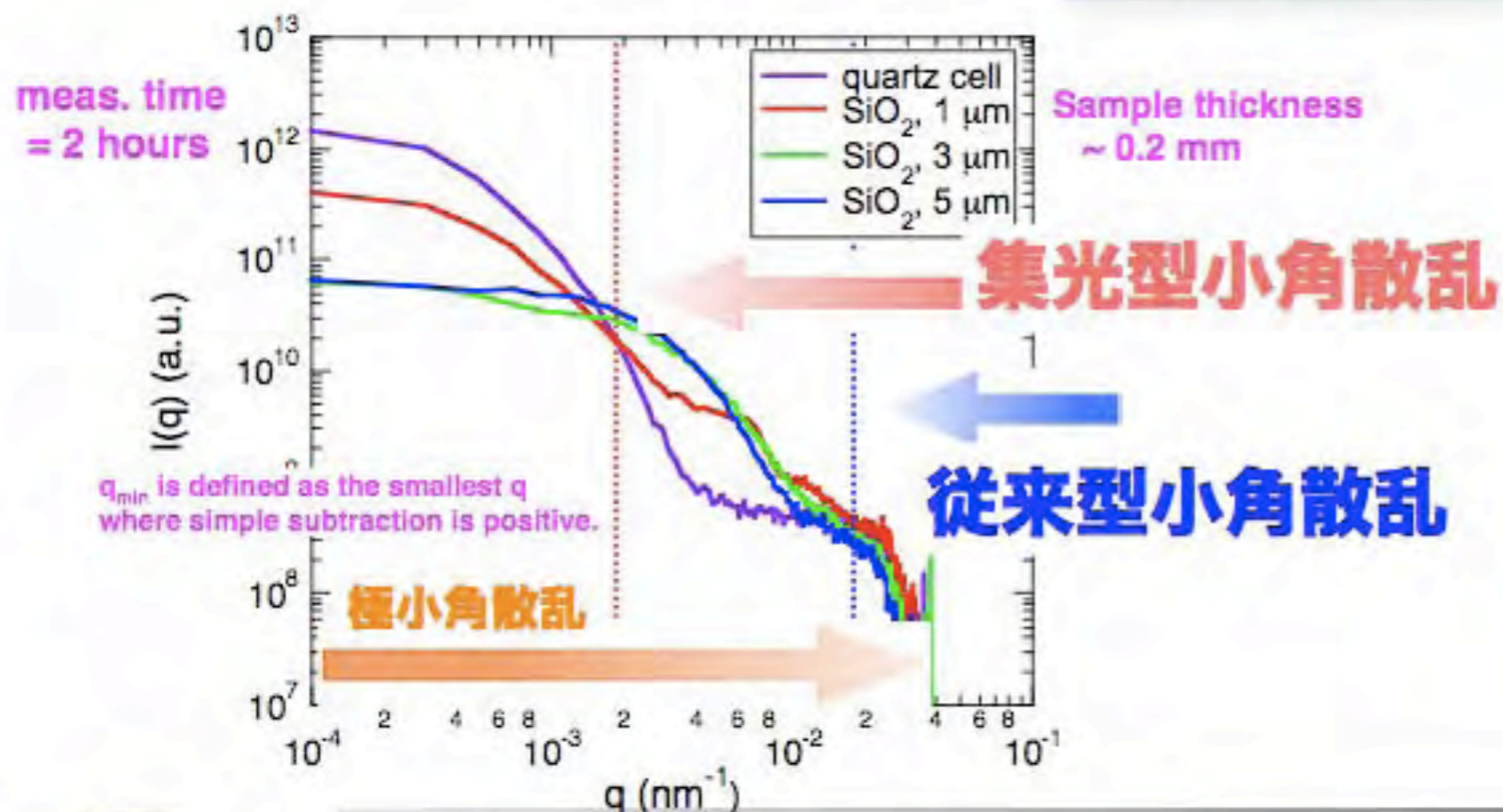
超伝導六極電磁石
Magnet Length=2m
Aperture=φ46.8mm



ハルバツ八型永久六極磁石
Magnet Length=0.3~2m (0.1m/unit)
Aperture=φ25mm



パルス六極電磁石
Magnet Length=2m
Aperture=φ22mm



集光型小角散乱は従来型に比べて観測可能な端数領域を1桁以上小角側に拡張した

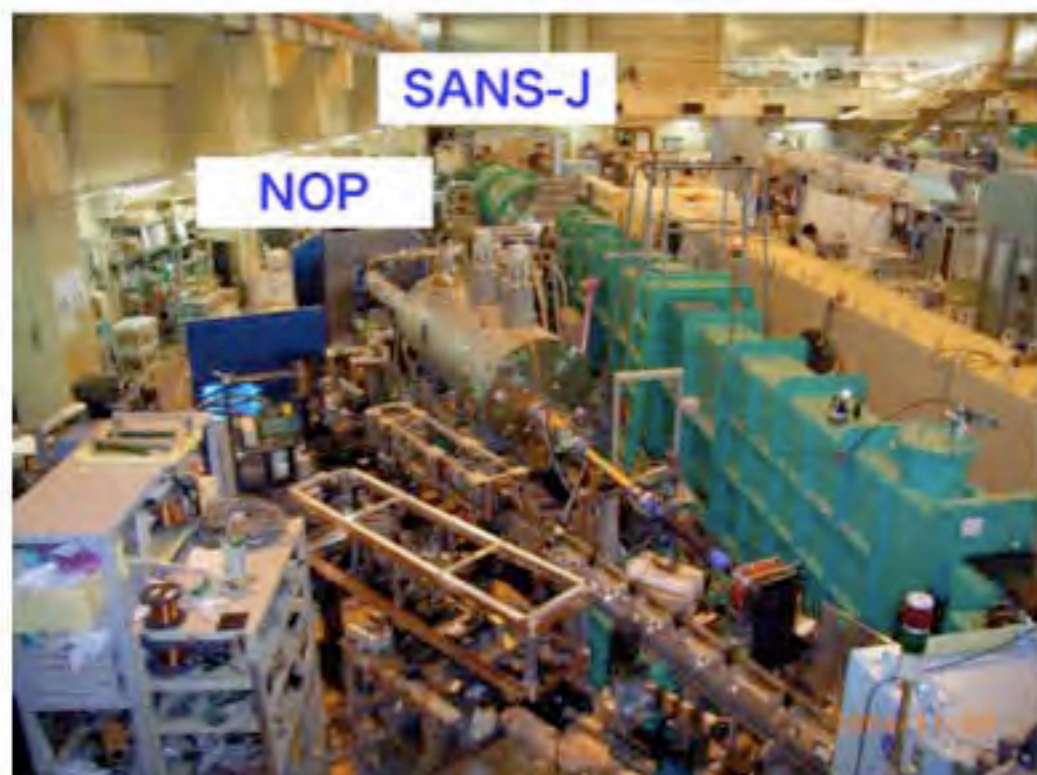
**中性子利用効率の
100倍以上の向上**



1-2. 応用中性子光学

特徴と課題

JRR-3実験装置



$$q = \frac{2\pi}{\lambda} \phi \rightarrow d = \frac{2\pi}{q}$$

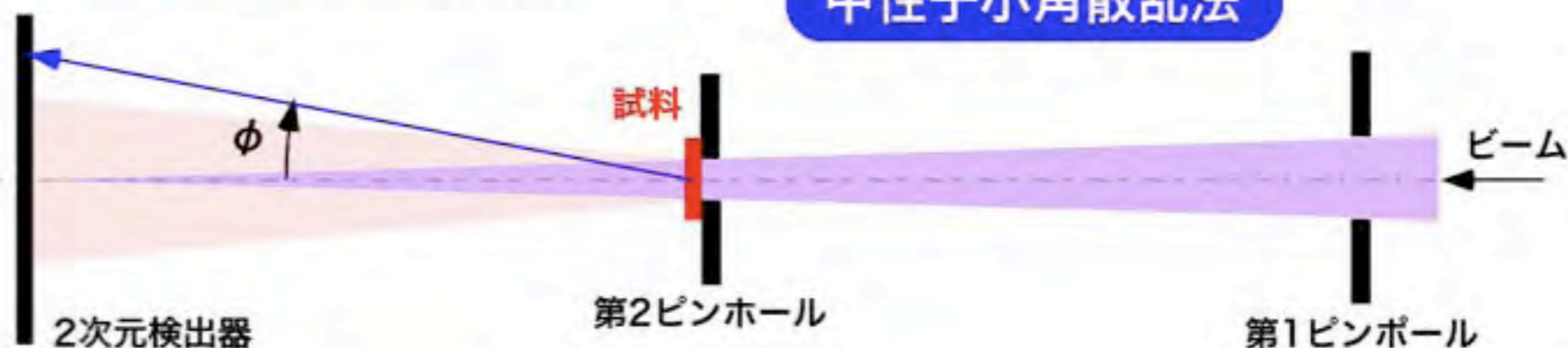
ϕ : 散乱角

λ : 波長

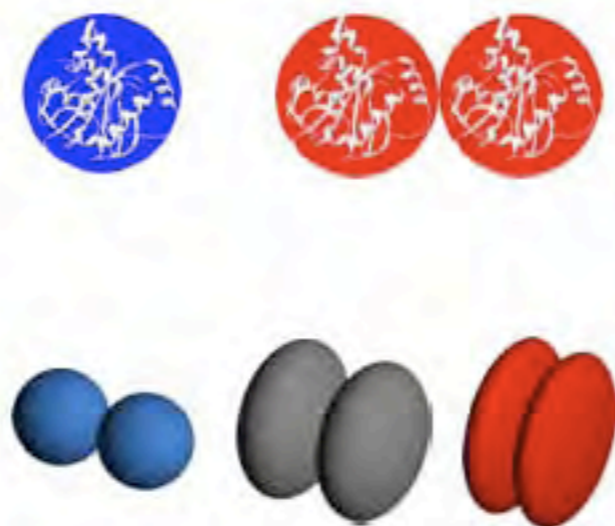
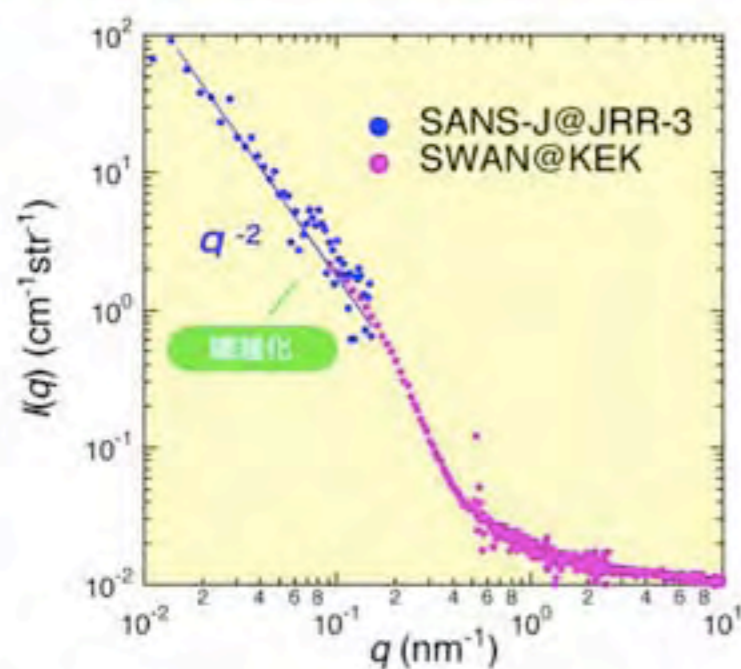
q : 散乱ベクトルサイズ

d : サイズ

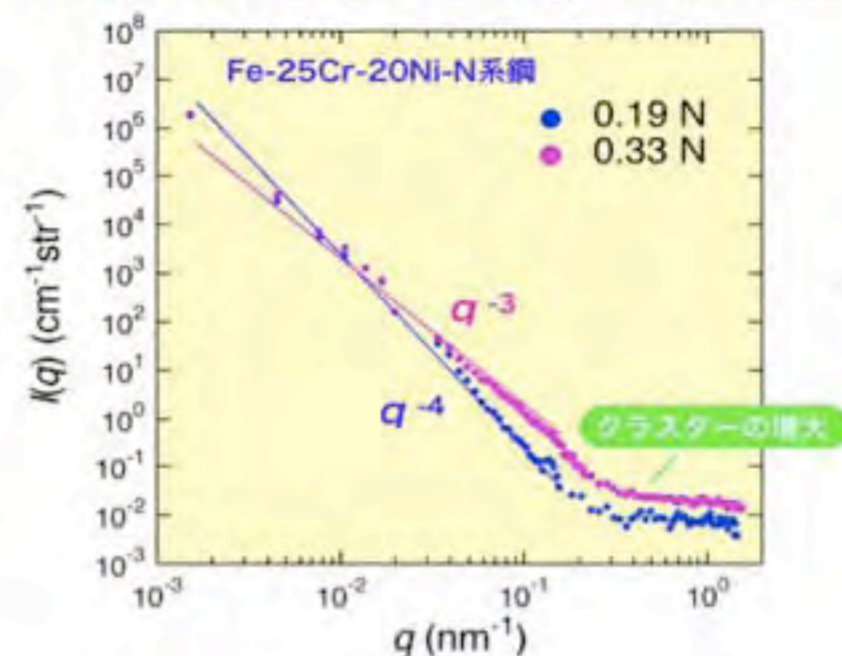
中性子小角散乱法



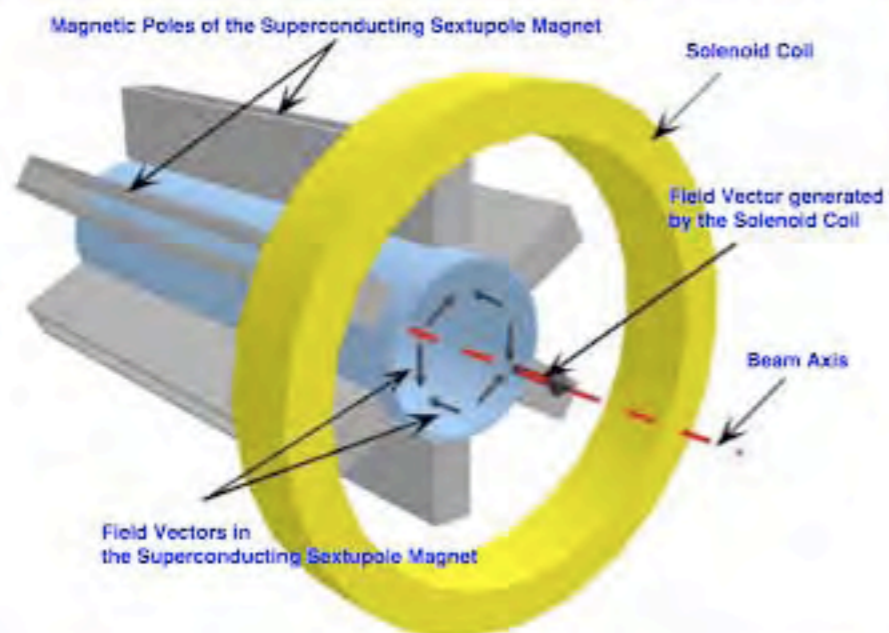
Protein Assembly in Water



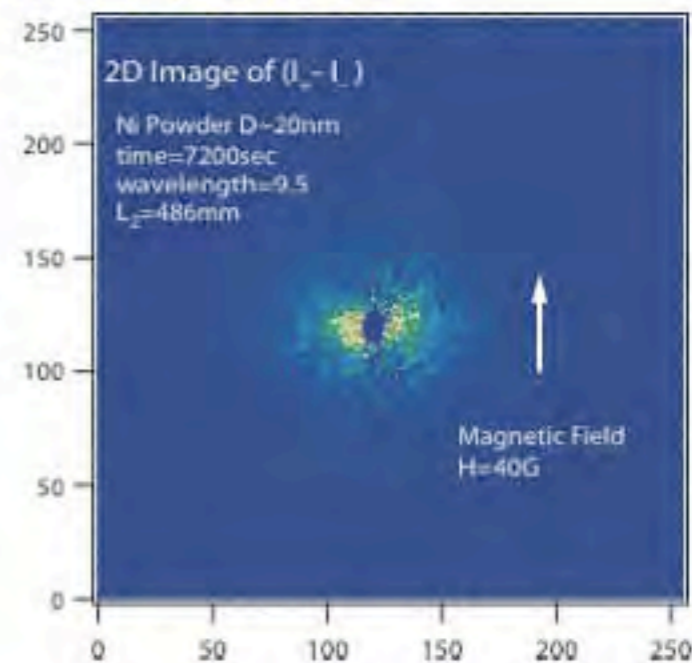
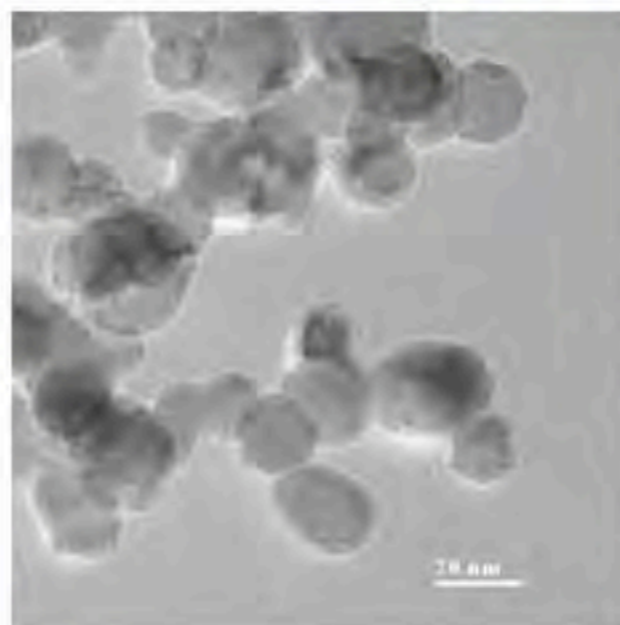
Atomic Cluster in Nitrogen-rich Steel



Magnetic Small Angle Neutron Scattering



magnetism of metal particles



高窒素オーステナイト系ステンレス鋼

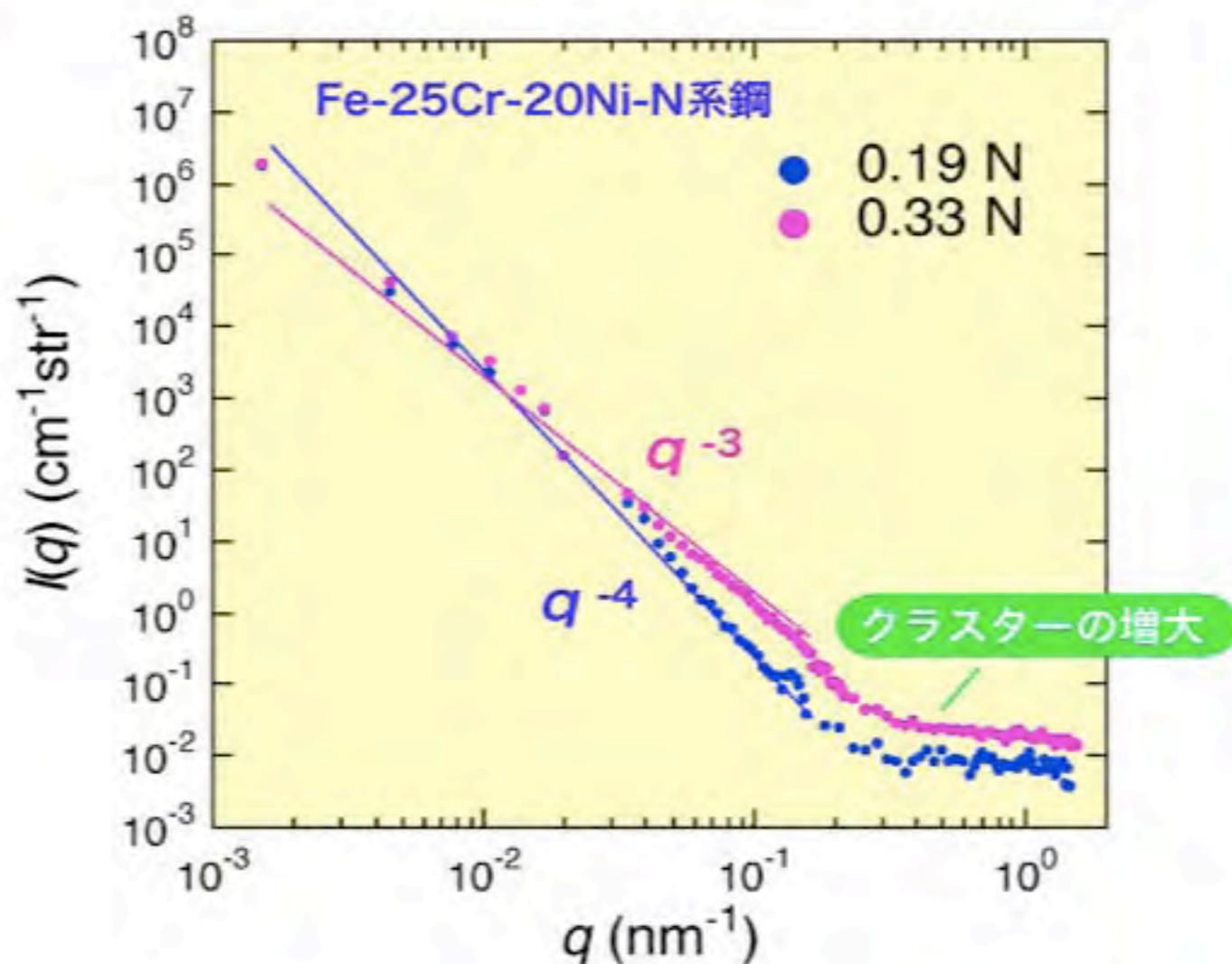
ステンレス鋼の問題

Niアレルギー (生体用金属材)
リサイクル性 (低環境負荷材)



Niフリーステンレス, 高窒素鋼

強度
加工性
耐腐食性
の向上



K. Ikeda et al. (2004)

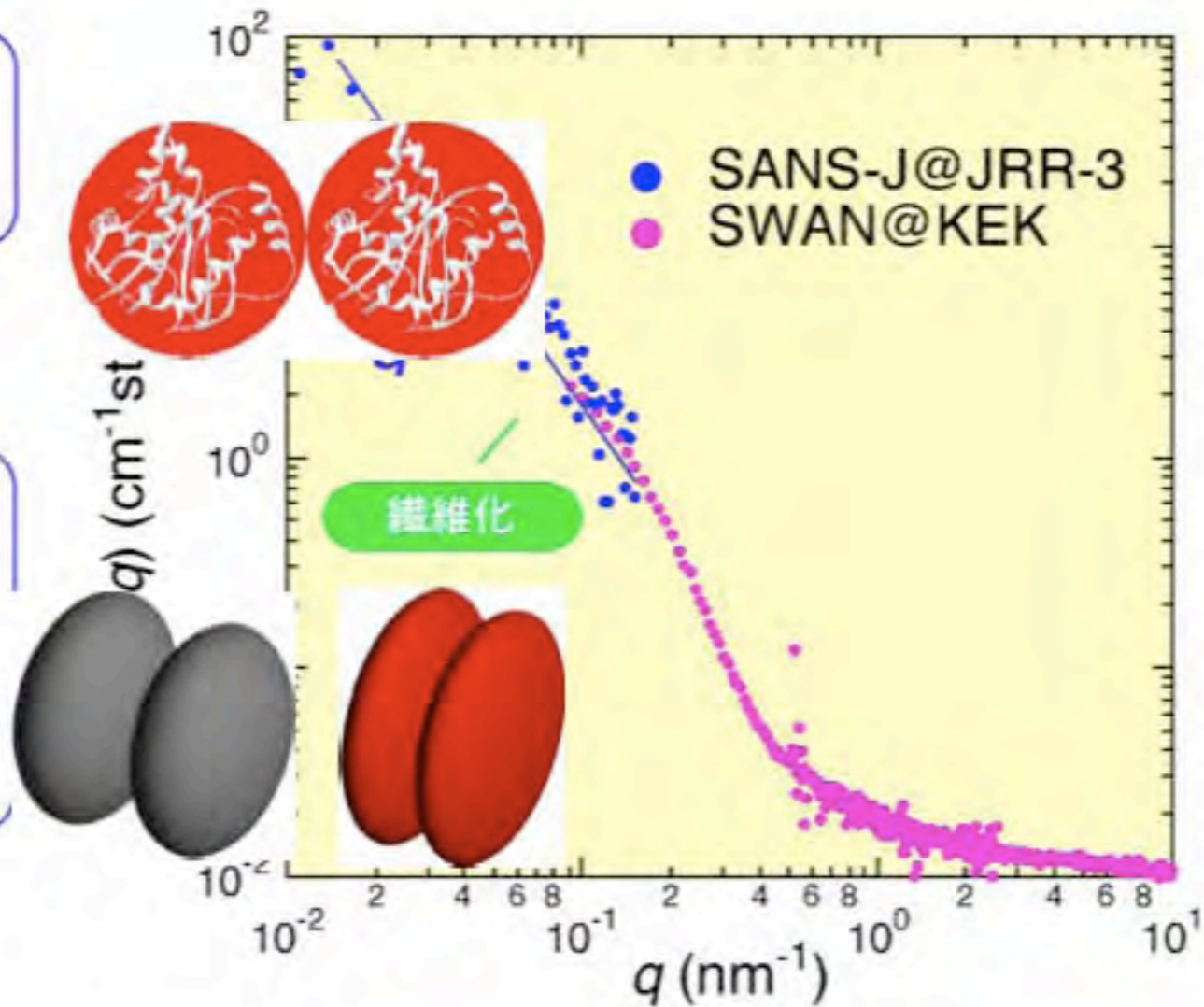


タウ蛋白質

アルツハイマー病患者の脳内に
繊維化したタウ蛋白質



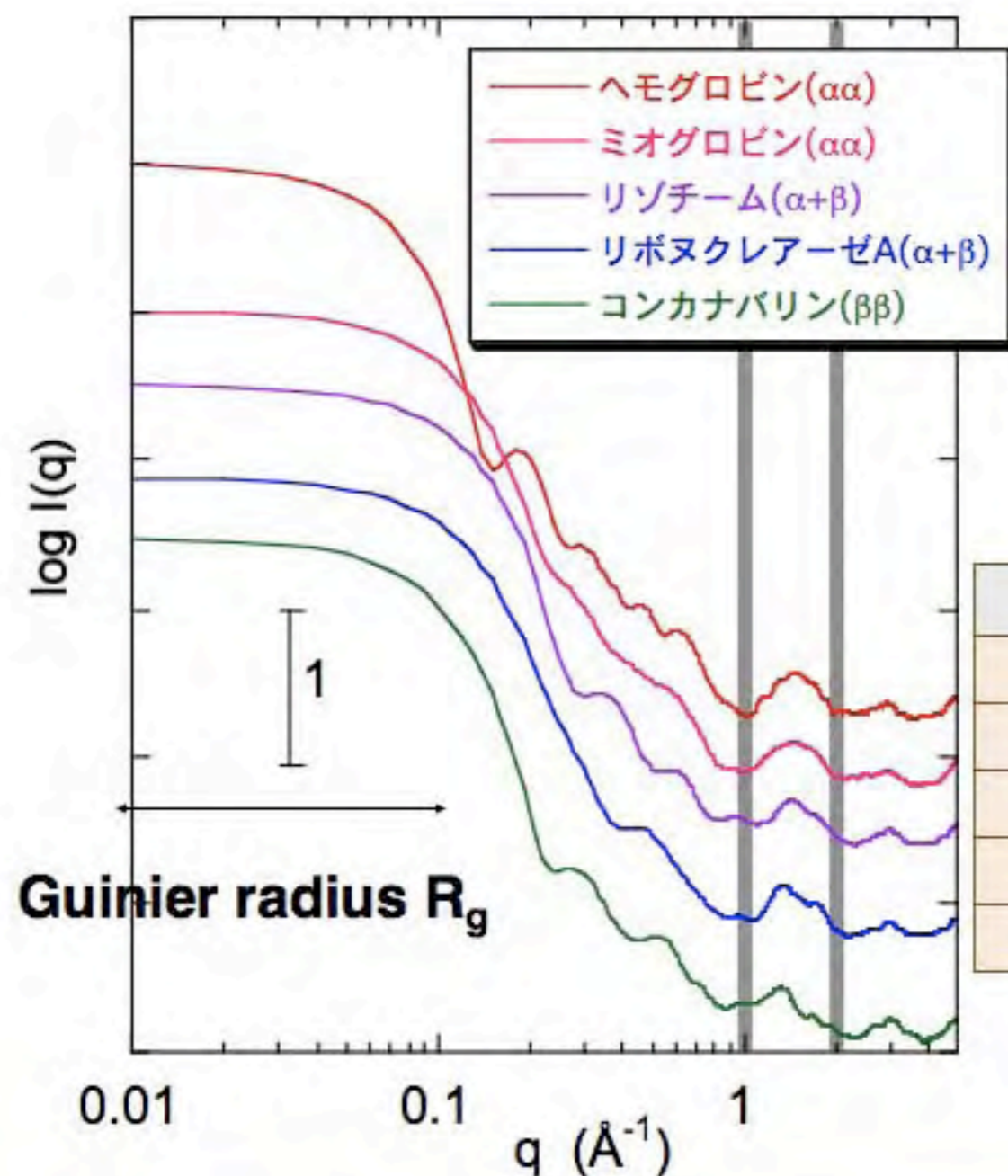
タウ蛋白質
神経軸索内微小管結合蛋白
微小管：細胞骨格
リン酸化 → 微小管



S. Naito et al. (2004)



Scattering curve of proteins in vacuo



Debye formula:

$$I(q) = \sum_i \sum_j f_i f_j \frac{\sin(qr_{ij})}{qr_{ij}}$$

	PDB code	α-helix	β-sheet
Hemoglobin	1hda	77.6%	0%
Myoglobin	1wla	85.6%	0%
Lysozyme	6lyz	27.1%	15.5%
Ribonuclease A	7rsa	17.7%	31.5%
Concanavalin A	3cna	0%	49.8%

calculated by H. Iwase

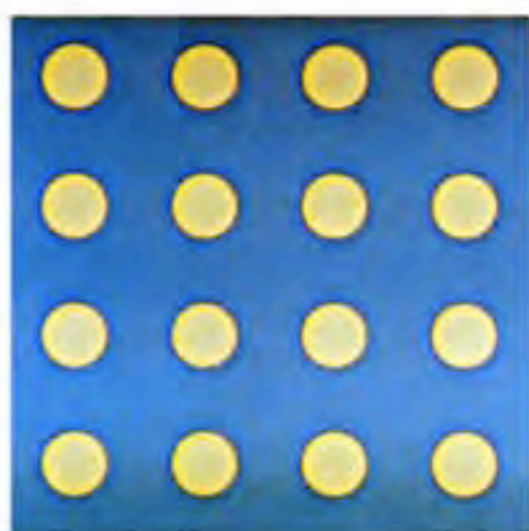


1-2. 応用中性子光学

中性子小角散乱について

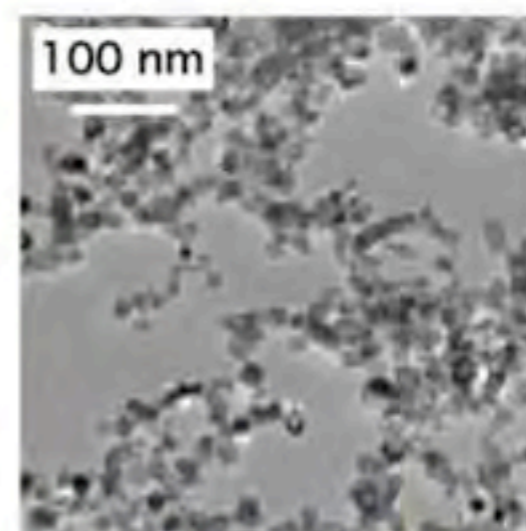
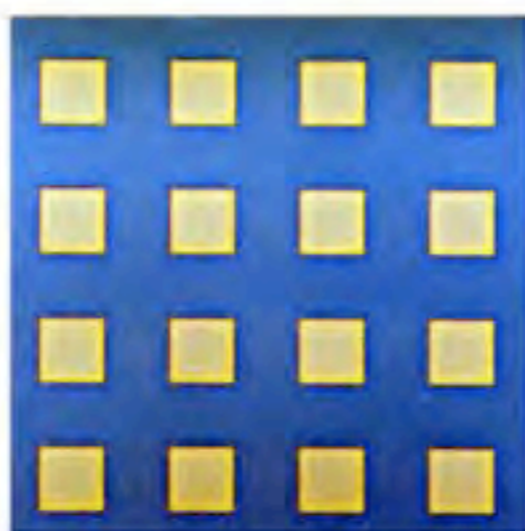
集光型偏極中性子小角散乱法による

微小超伝導体，微小磁性体のサイズ効果と
内部構造及び機能に関する研究



3 μm

微小超伝導体



金属微粒子

粒子数の減少、波動関数や電荷の閉じ込め、単磁区

→ エネルギー準位の離散化、バンドギャップ幅増大、

電荷再結合、保磁力増大

表面の役割の増大

→ 反応性の変化、吸着、触媒

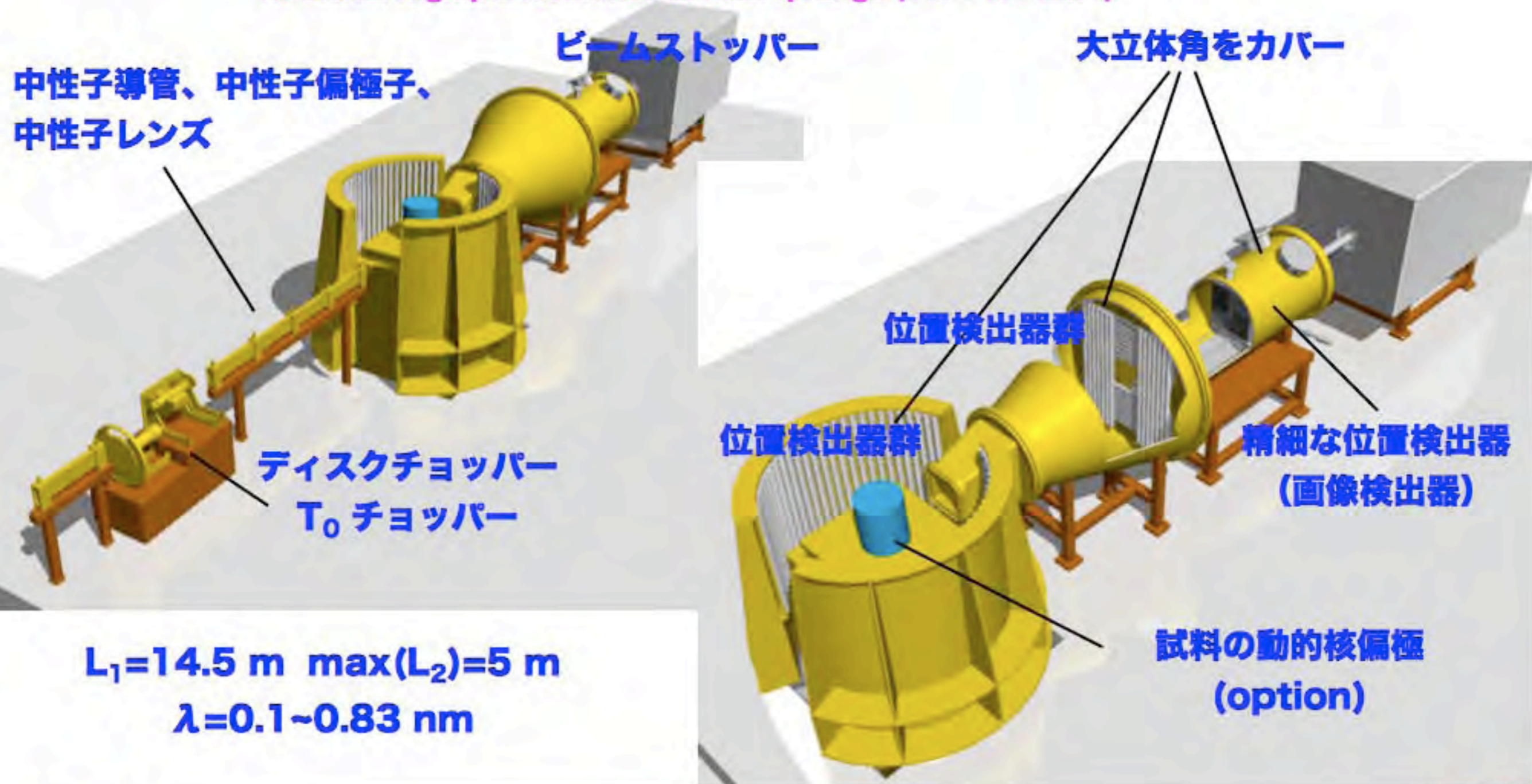


1-2. 応用中性子光学

中性子小角散乱について

J-PARCにおける大強度中性子小角散乱装置(HI-SANS)

HI-SANS: High performance in wide q range (10^{-3} ~ 10^2 nm $^{-1}$)

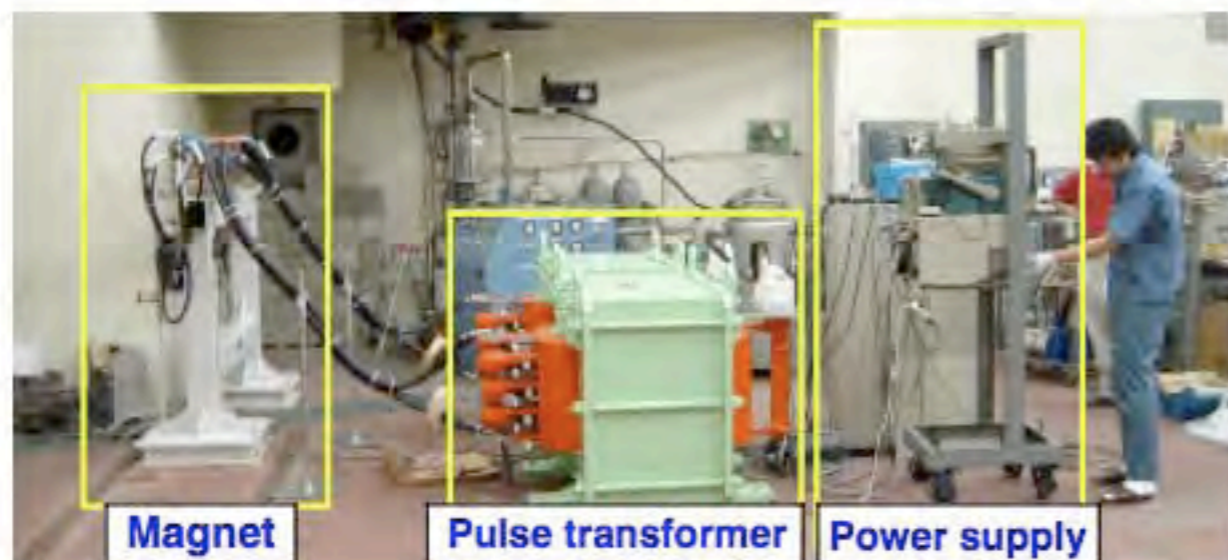


$L_1=14.5$ m $\max(L_2)=5$ m
 $\lambda=0.1\sim 0.83$ nm



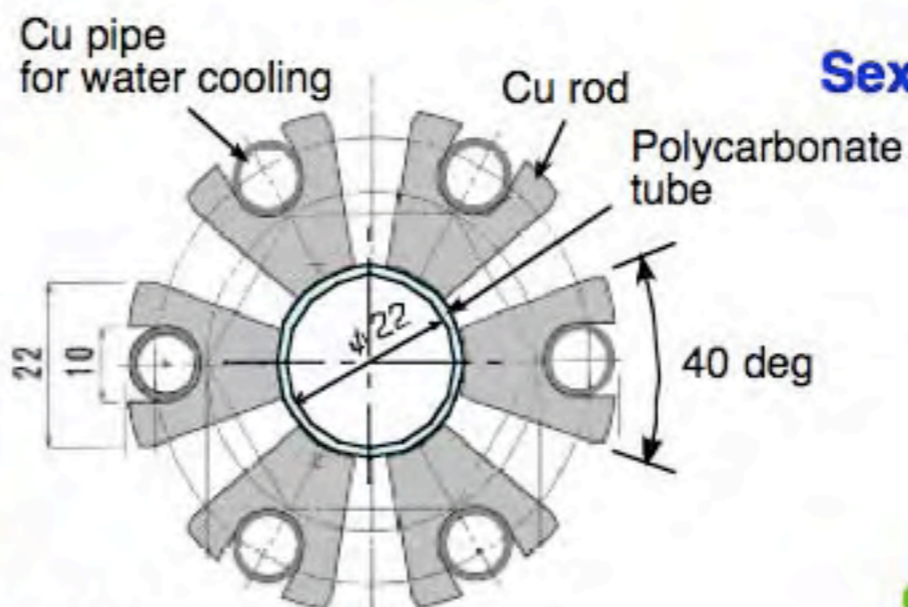
F-SANS for Pulsed Sources

Pulsed Sextupole Magnet

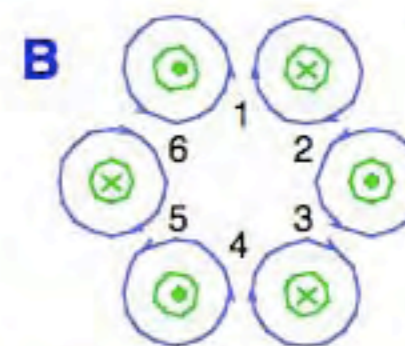


Specifications

- Effective magnet length = 2 m
- Effective bore diameter = 22 mm
- $G = 7,500 \text{ T/m}^2 @ I = 60 \text{ kA}$



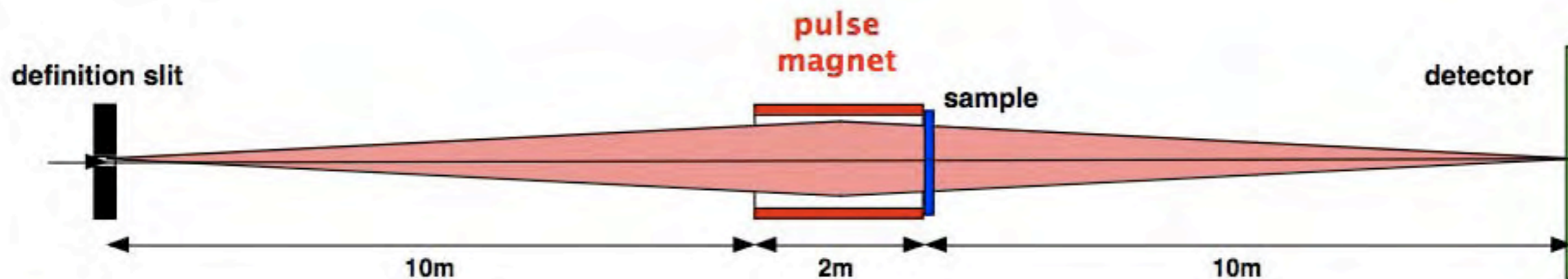
Sextupole magnetic field



electric current

J.Suzuki, Y.Kiyanagi et al., JAERI / Hokkaido Univ.

Pulse F-SANS



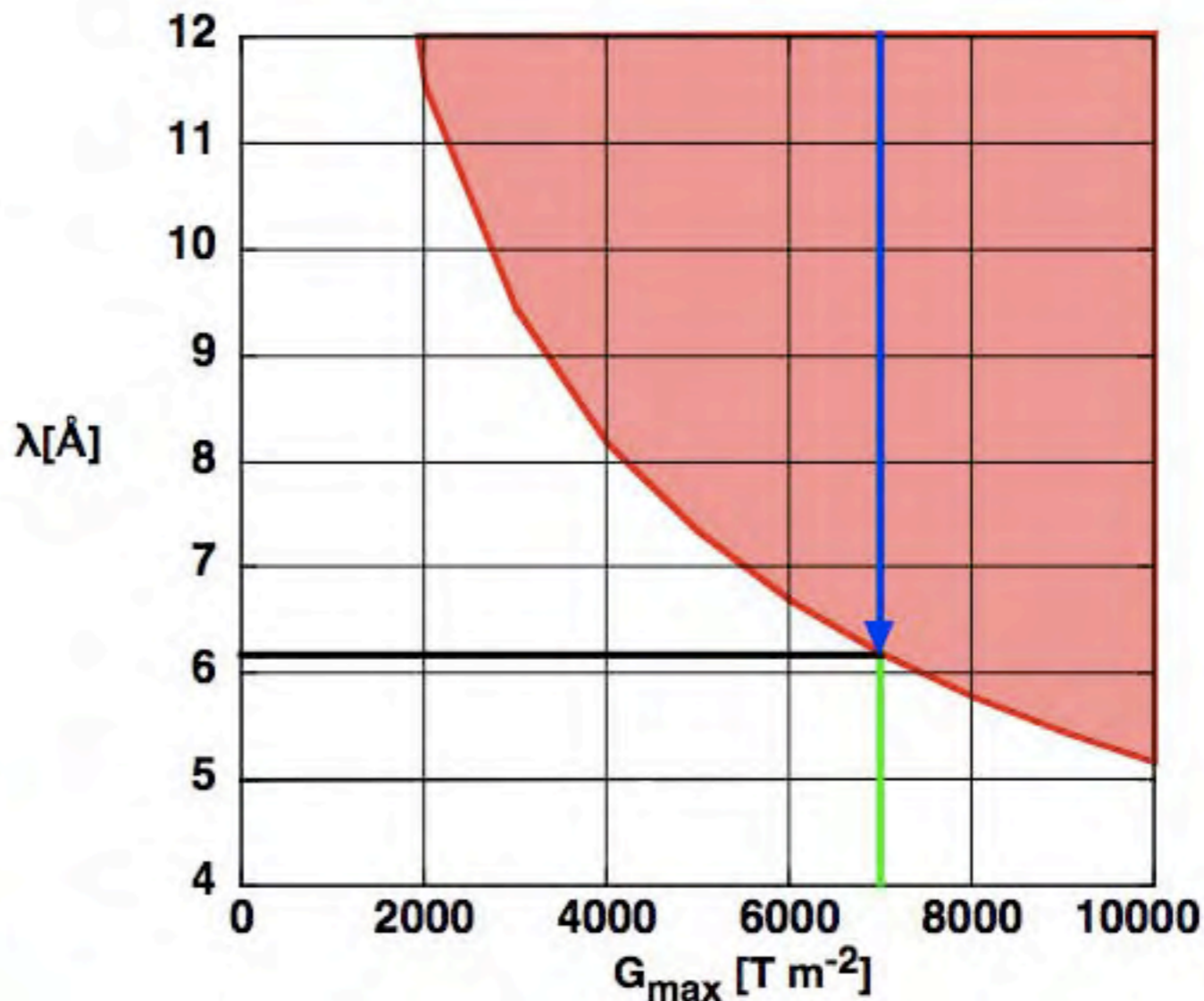
pulse magnet

2-m long

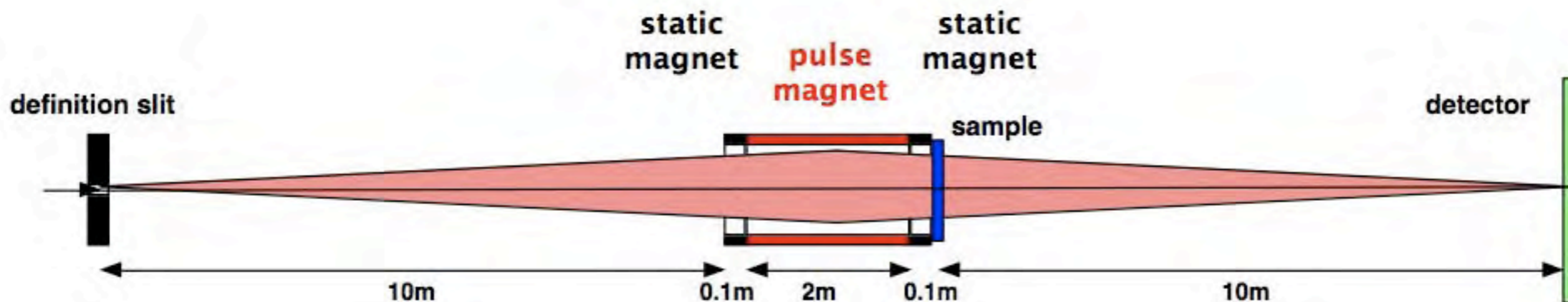
$$G_{\max} = 7000 \text{ T m}^{-2}$$

tunable λ -region

$$\lambda \geq 6 \text{ \AA}$$



Pulse F-SANS



pulse magnet

2-m long

$$G_{\max} = 7000 \text{ T m}^{-2}$$

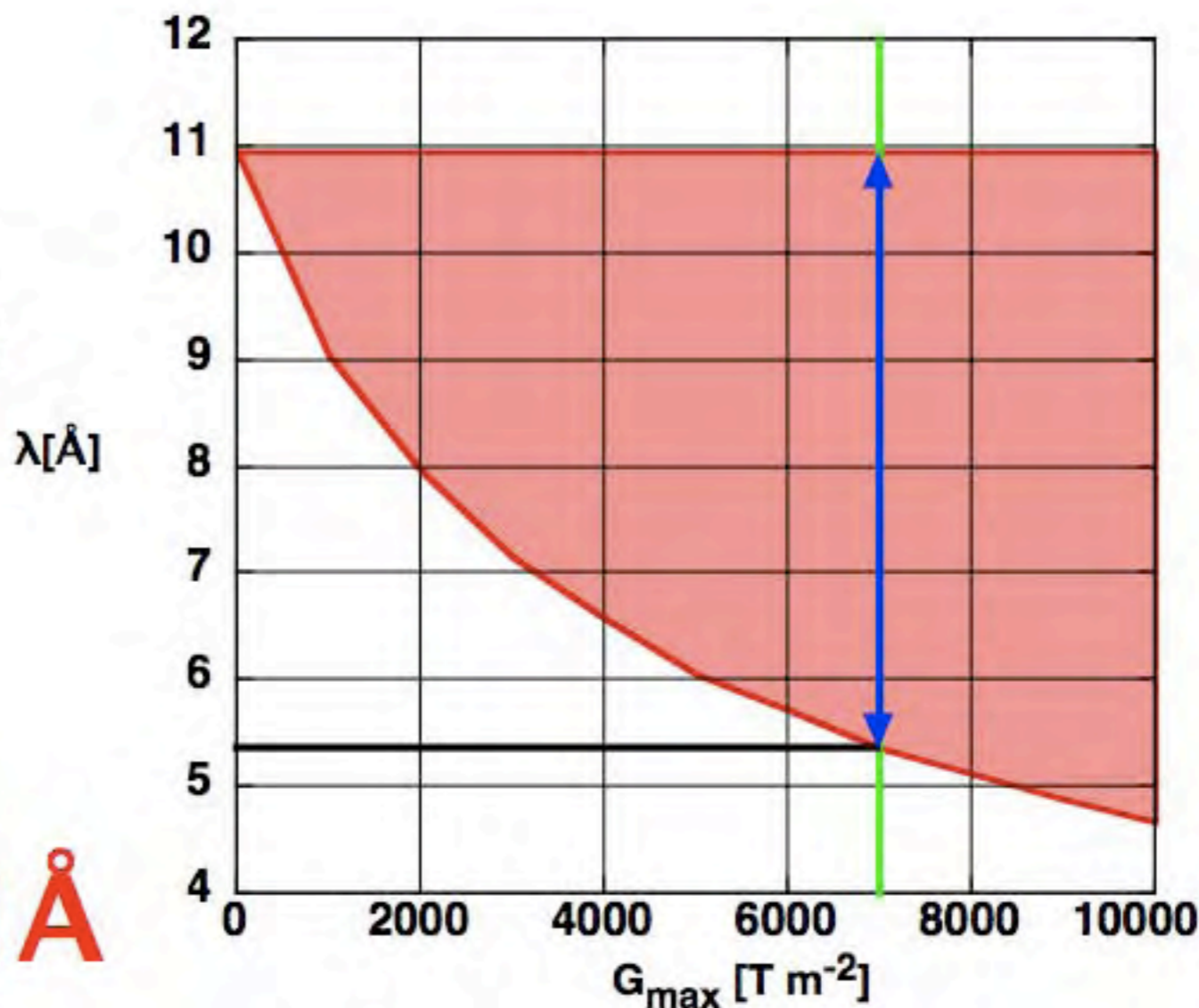
2 permanent magnets

0.1-m long each

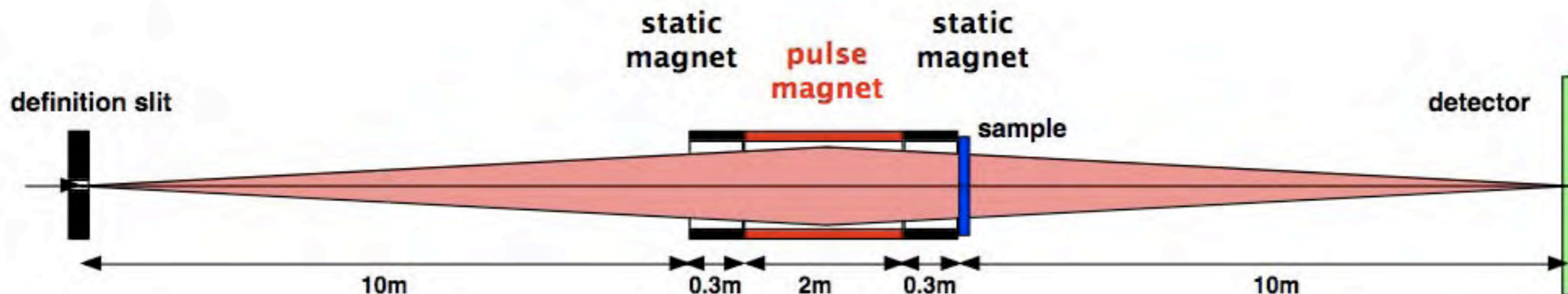
$$G = 23000 \text{ T m}^{-2}$$

tunable λ -region

$$5.3\text{\AA} \leq \lambda \leq 11\text{\AA}$$



Pulse F-SANS



pulse magnet

2-m long

$$G_{\max} = 7000 \text{ T m}^{-2}$$

2 permanent magnets

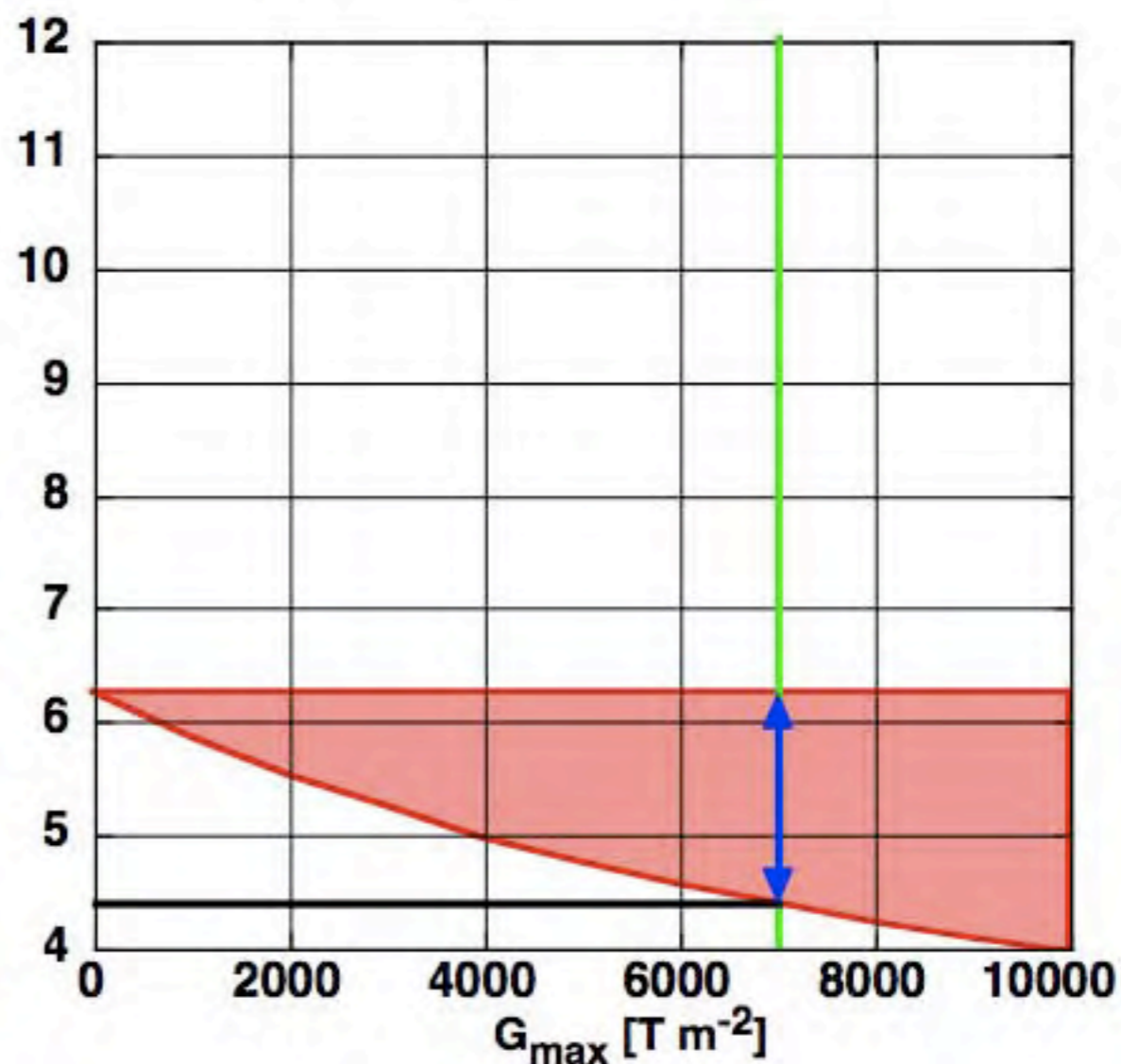
0.3-m long each

$$G = 23000 \text{ T m}^{-2}$$

tunable λ -region

$$4.4\text{\AA} \leq \lambda \leq 6.2\text{\AA}$$

$\lambda[\text{\AA}]$

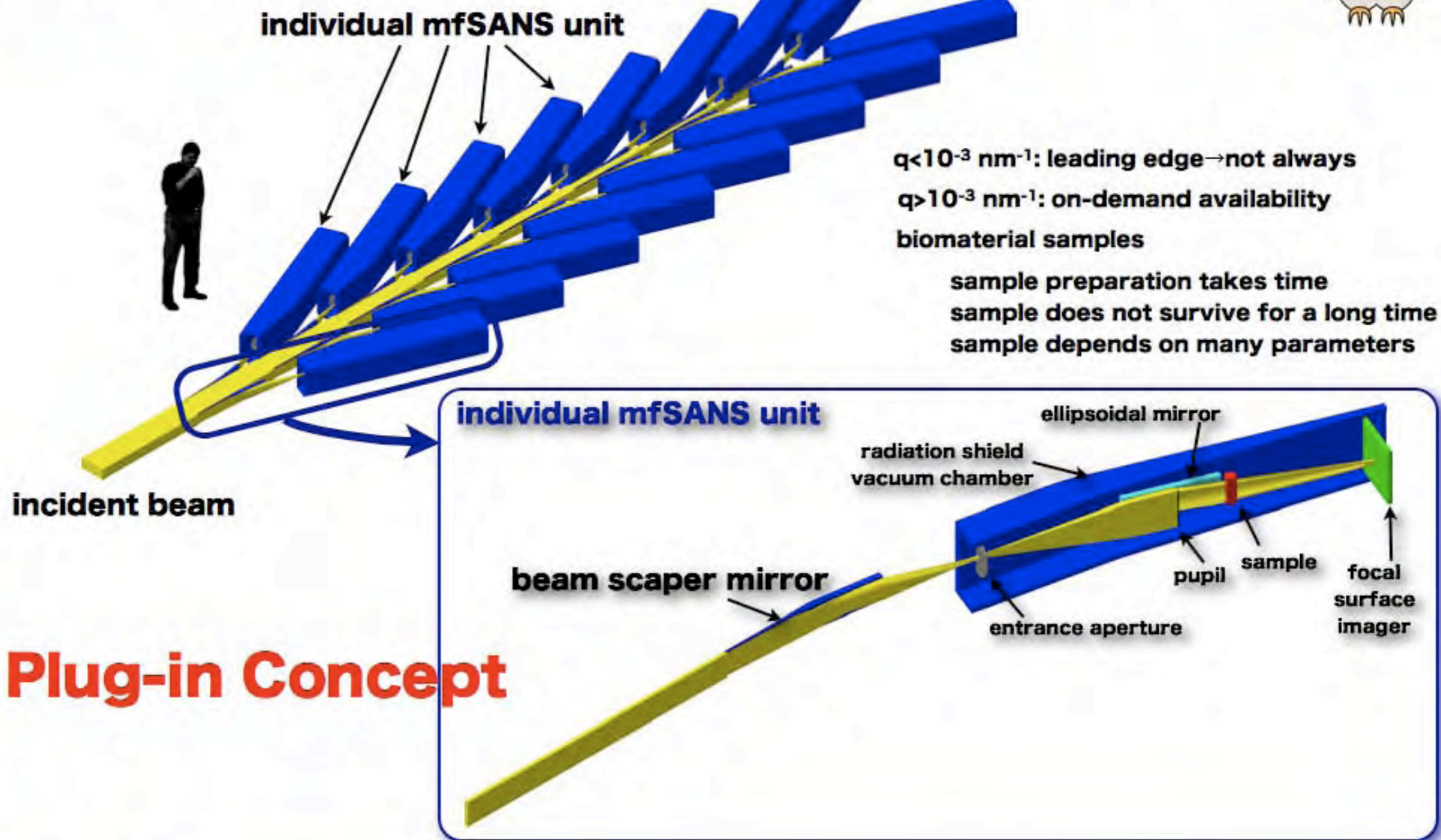


mfSANS (多分岐集光型小角散乱)

M.Furusaka et al.



for accepting on-demand access and long-term occupation of :



Plug-in Concept



mfSANS (多分岐集光型小角散乱)

“小角散乱” (多分岐集光型小角散乱) において想定される研究例

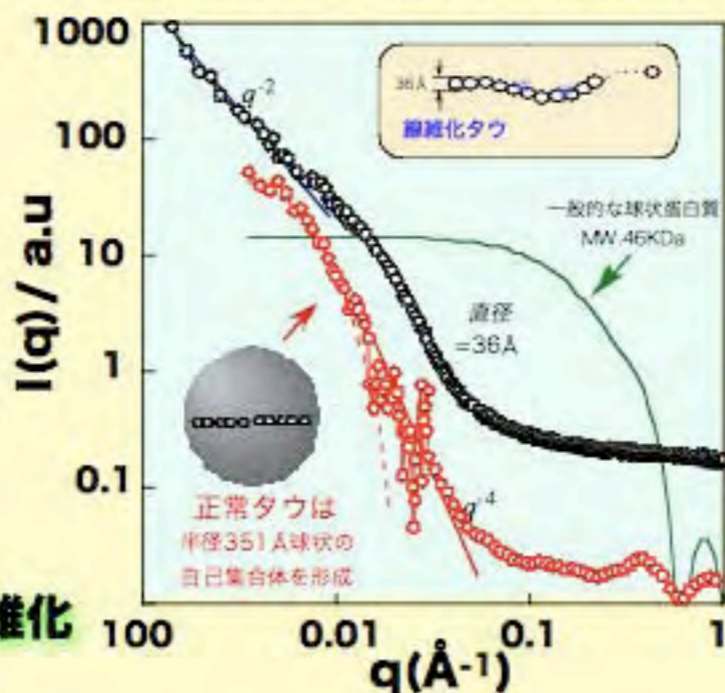
軽元素系物質中のナノスケール秩序状態観察 → 水溶液中蛋白異常凝集 → 疾患研究

1. 脳疾患とタンパク質の異常凝集 (神経原線維変性、細胞死)

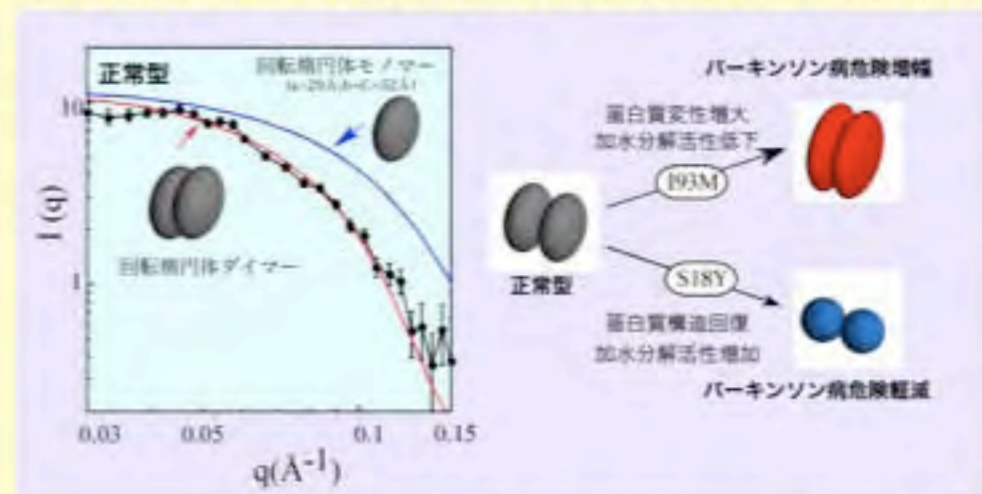


酸化により線維化

◎アルツハイマー病 (海馬)
・微小管結合タウの構造異常 → 細胞膜破壊



◎パーキンソン病 (黒質)
・プロテアソームシステム(UCH-L1)異常 → 不用なタンパク質の除去



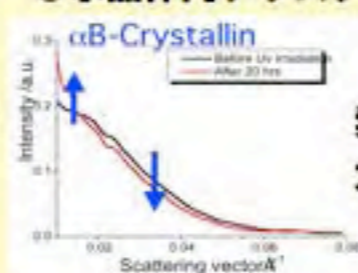
Biochem.Biophys.Res.Com., 339(2006) 715

UCH-L1は水中で二量体
構造変形と活性、発症の危険性と一致

2. 白内障とタンパク質の異常凝集



◎水晶体内クリスタリンの構造異常



異常な凝集を抑制する
疾患の予防・治療薬の
開発へ

Applications at JRR-3

Magnetic Lenses for SANS

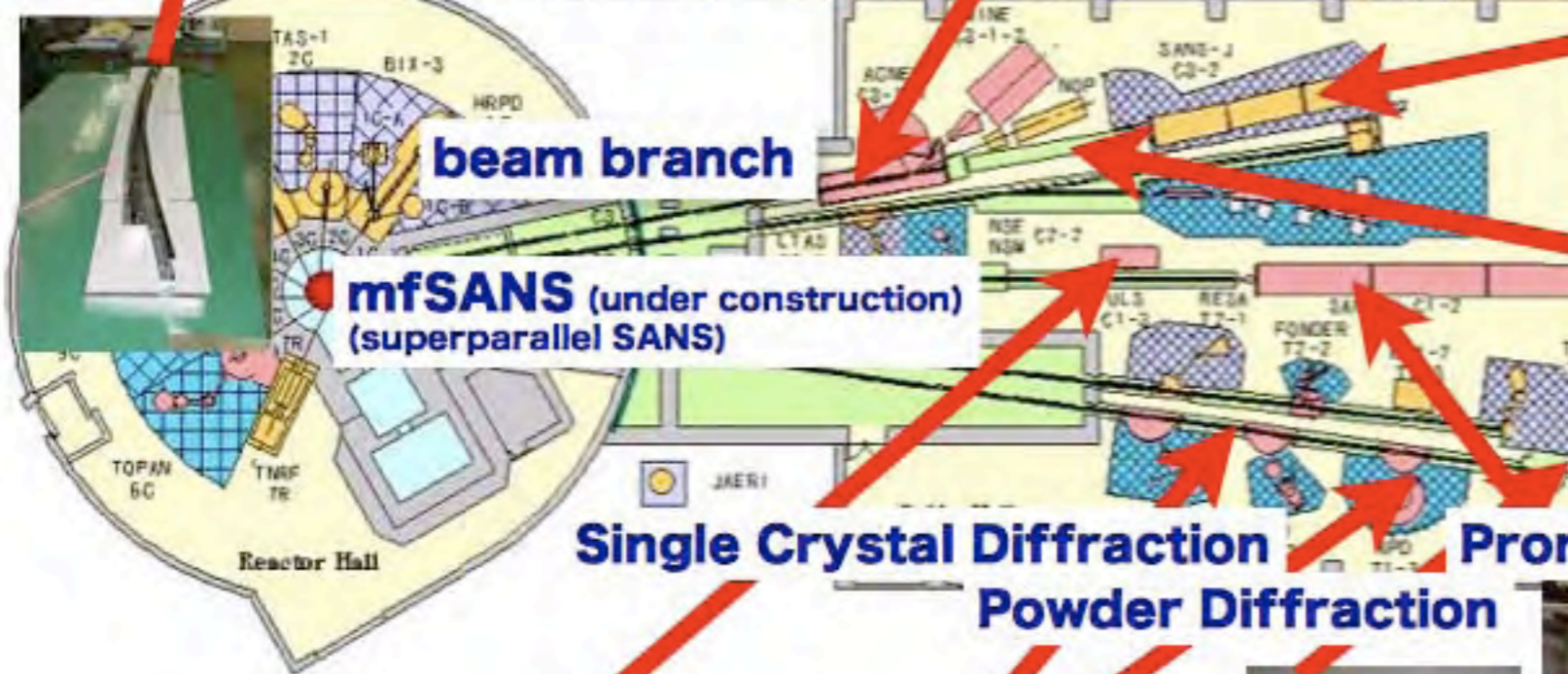
3-fold beam branch



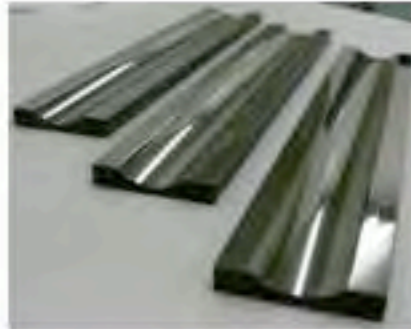
Focusing SANS



Imaging Detectors



Focusing SANS



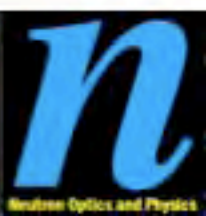
Ellipsoidal Supermirrors for mfSANS



Multichannel Focusing Guides



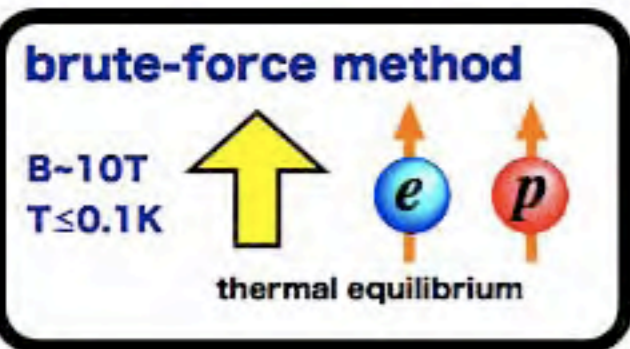
Focusing SANS



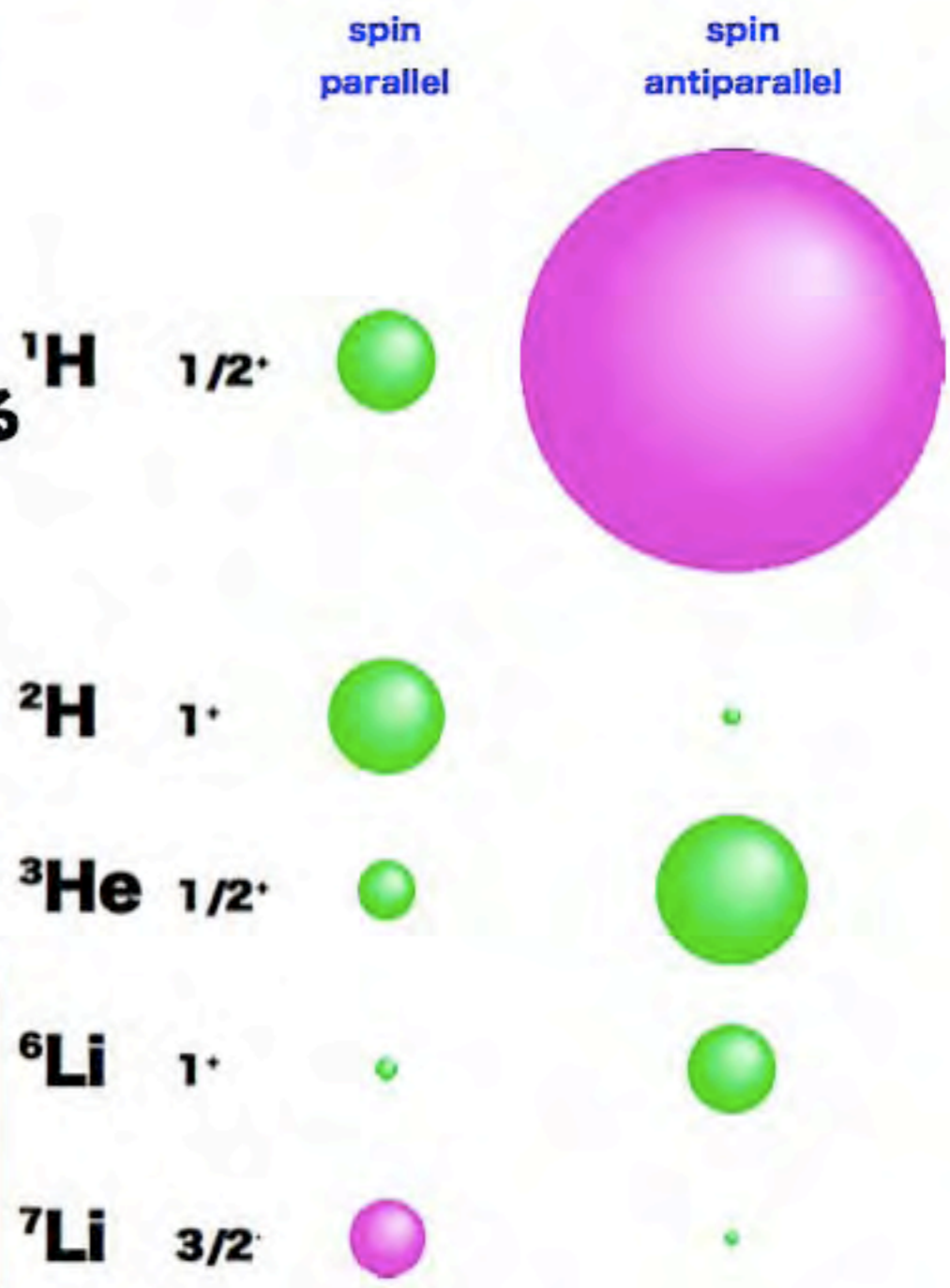
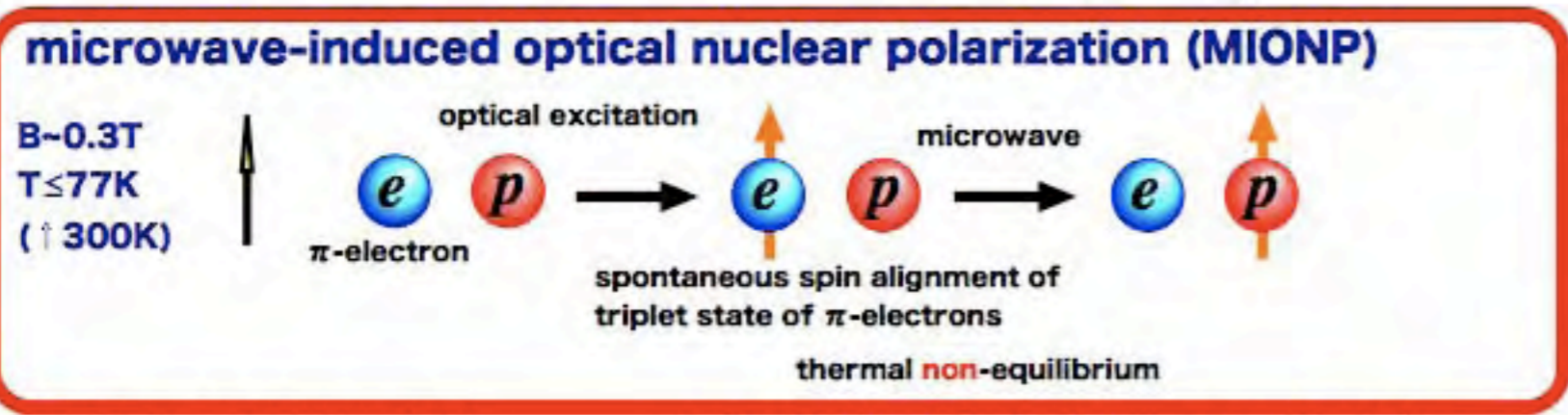
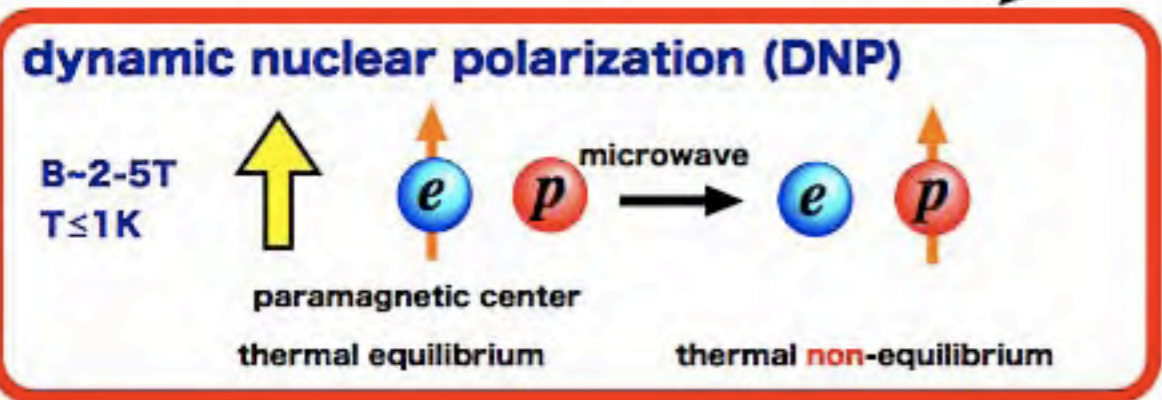
1-2. 応用中性子光学

試料内水素核偏極による水素識別能力の向上

- 非干渉性散乱成分の分離
- スピンコントラスト法による水素識別



熱非平衡状態での核偏極
→ サイト毎のラベルを可能とする



M.linuma et al. (Kyoto Univ.) P~0.4-0.7 in bulk at LN₂ temp. and B=3kG

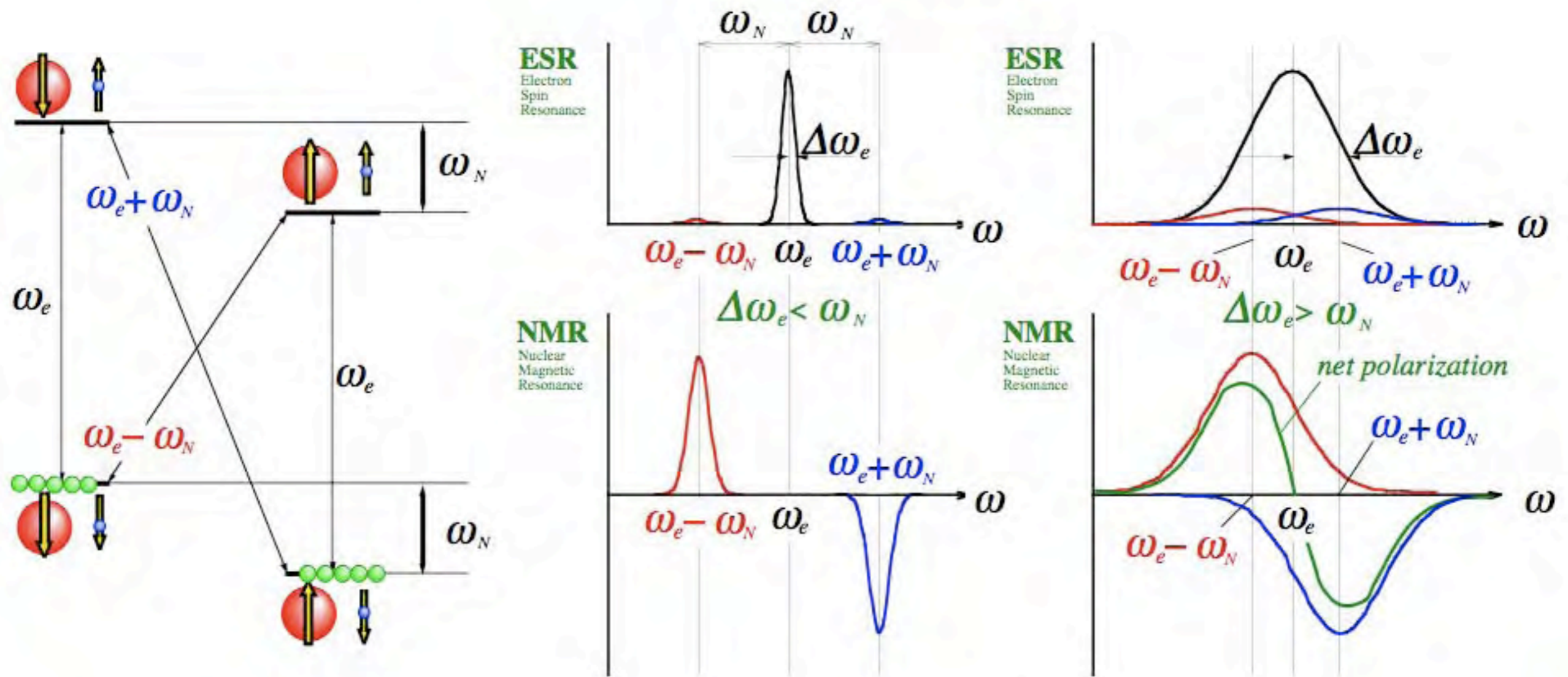


Site-specific Spin Contrast Variation

DNP: Dynamic Nuclear Polarization

(Differential) Solid Effect

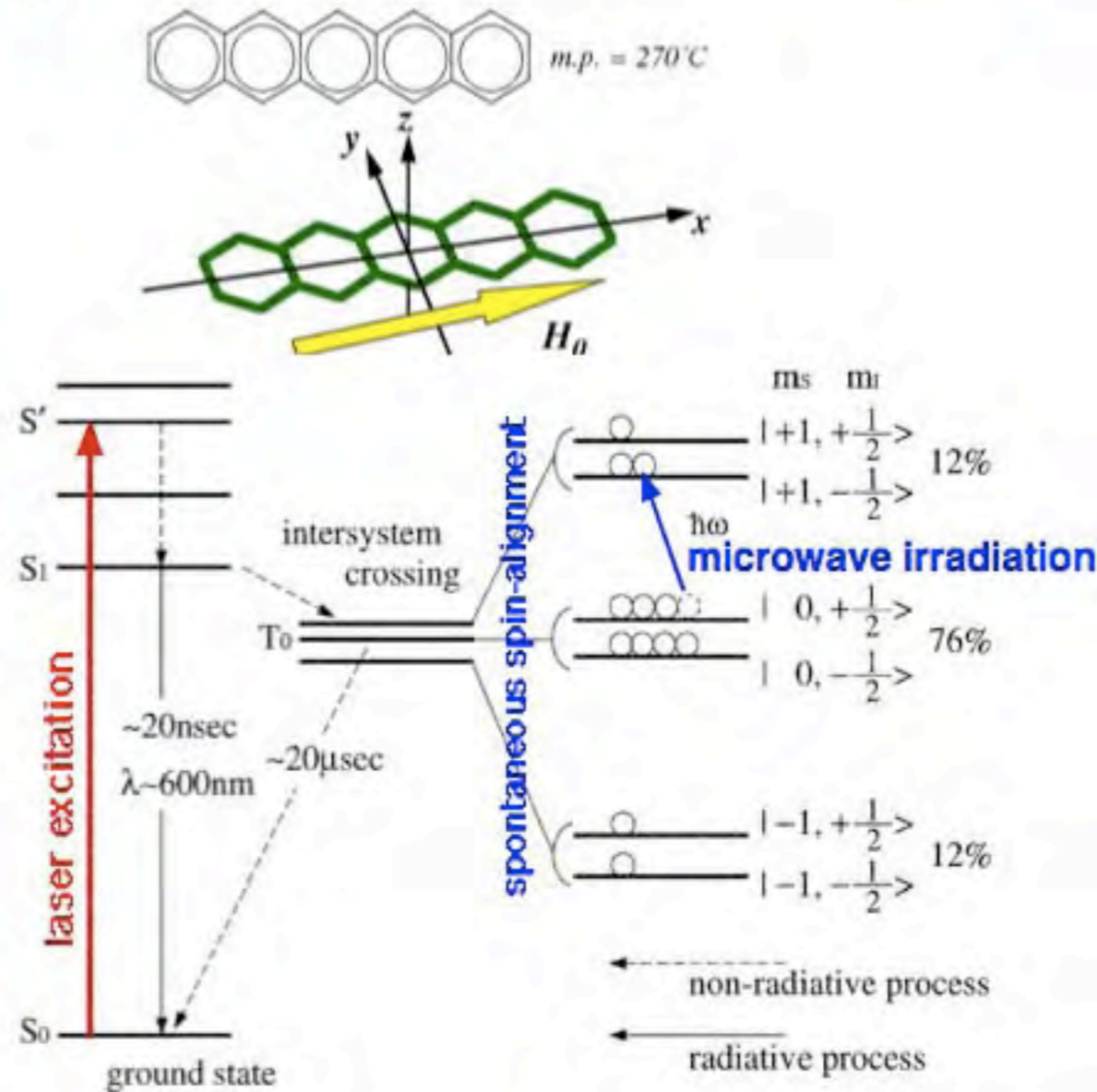
for narrow ESR $\Delta\omega_e < \omega_N$



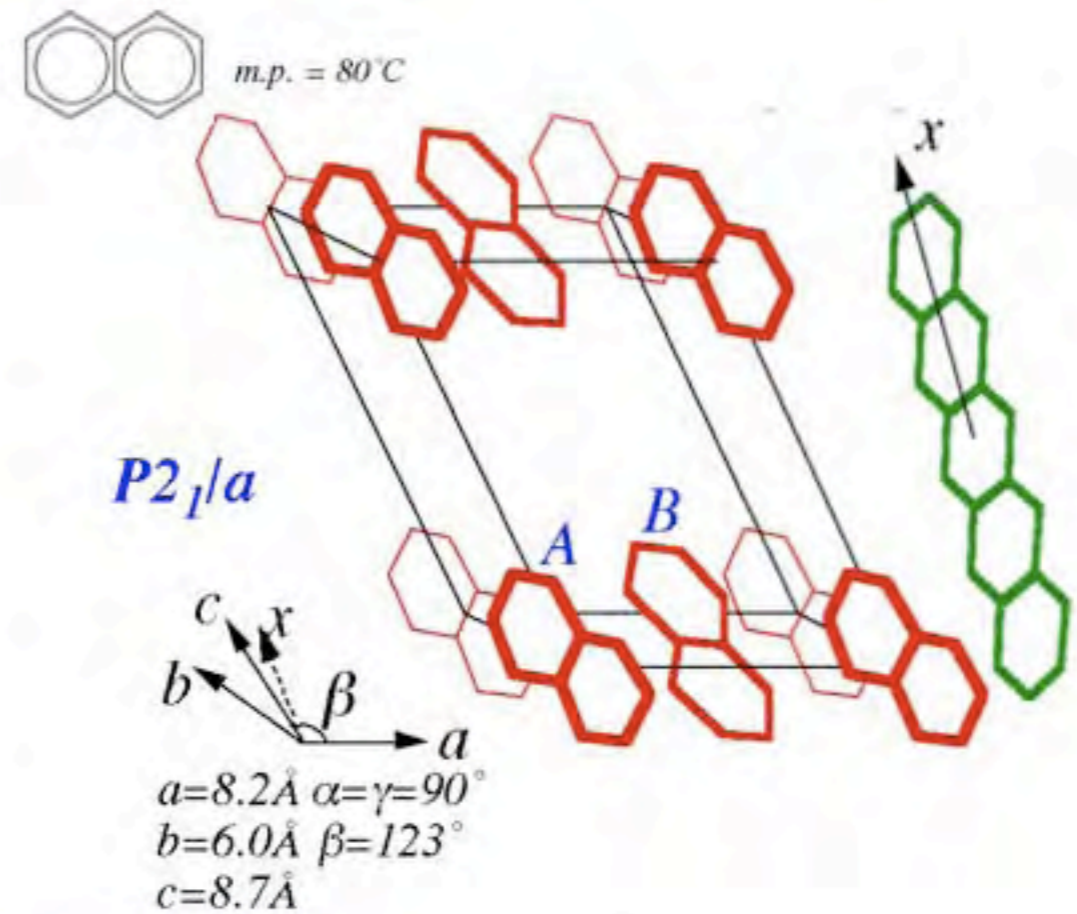
Site-specific Spin Contrast Variation

MIONP: Microwave-Induced Optical Nuclear Polarization

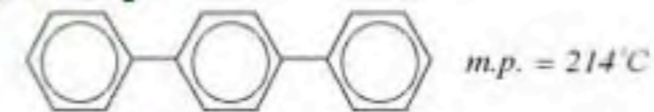
pentacene



host crystal to align pentacene naphthalene



p-terphenyl



Nuclear Spin-Lattice Relaxation Time
 40 min @ room temperature
 70 min @ 0°C

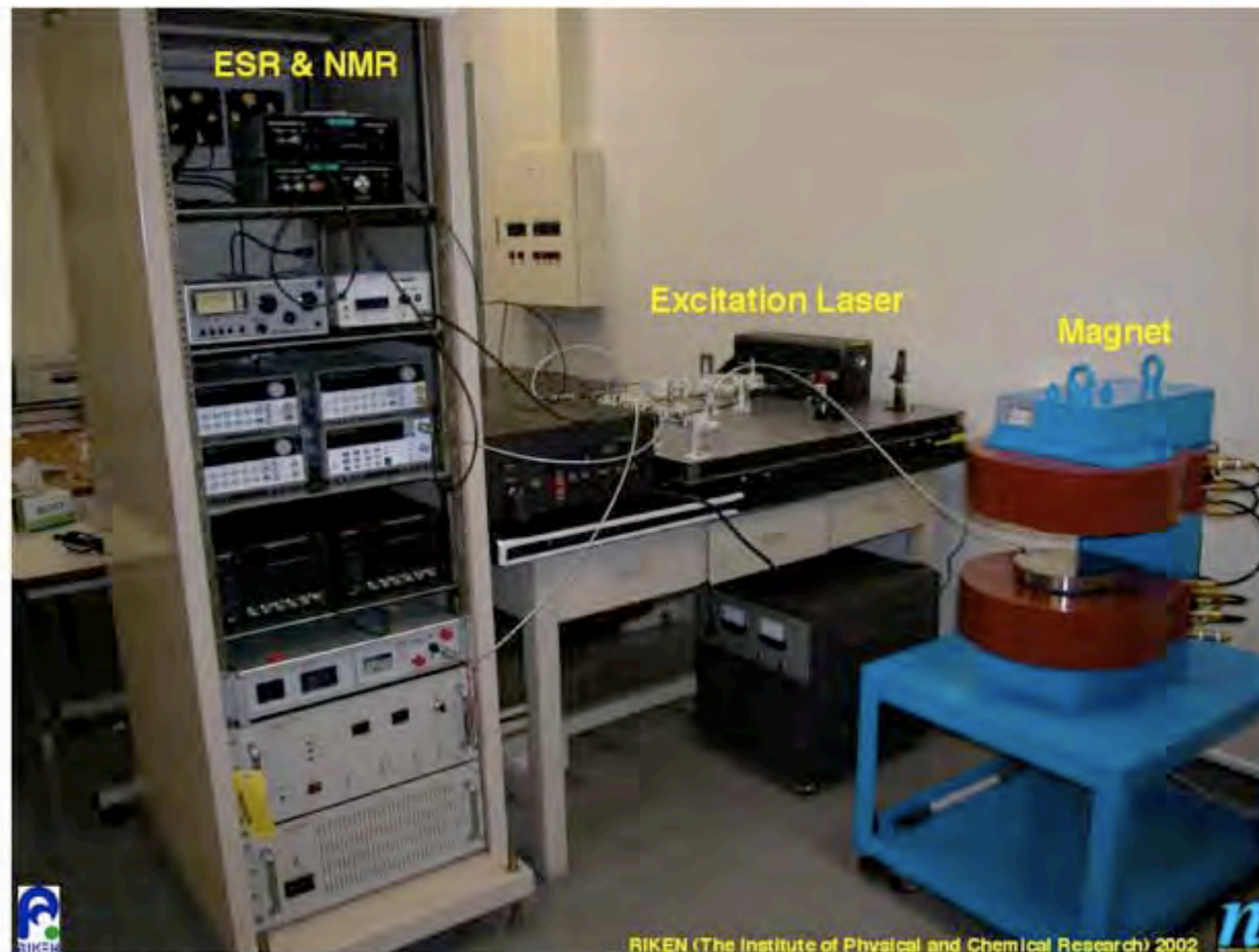


MIONP

Microwave-induced Optical Nuclear Polarization マイクロ波誘導型光核偏極

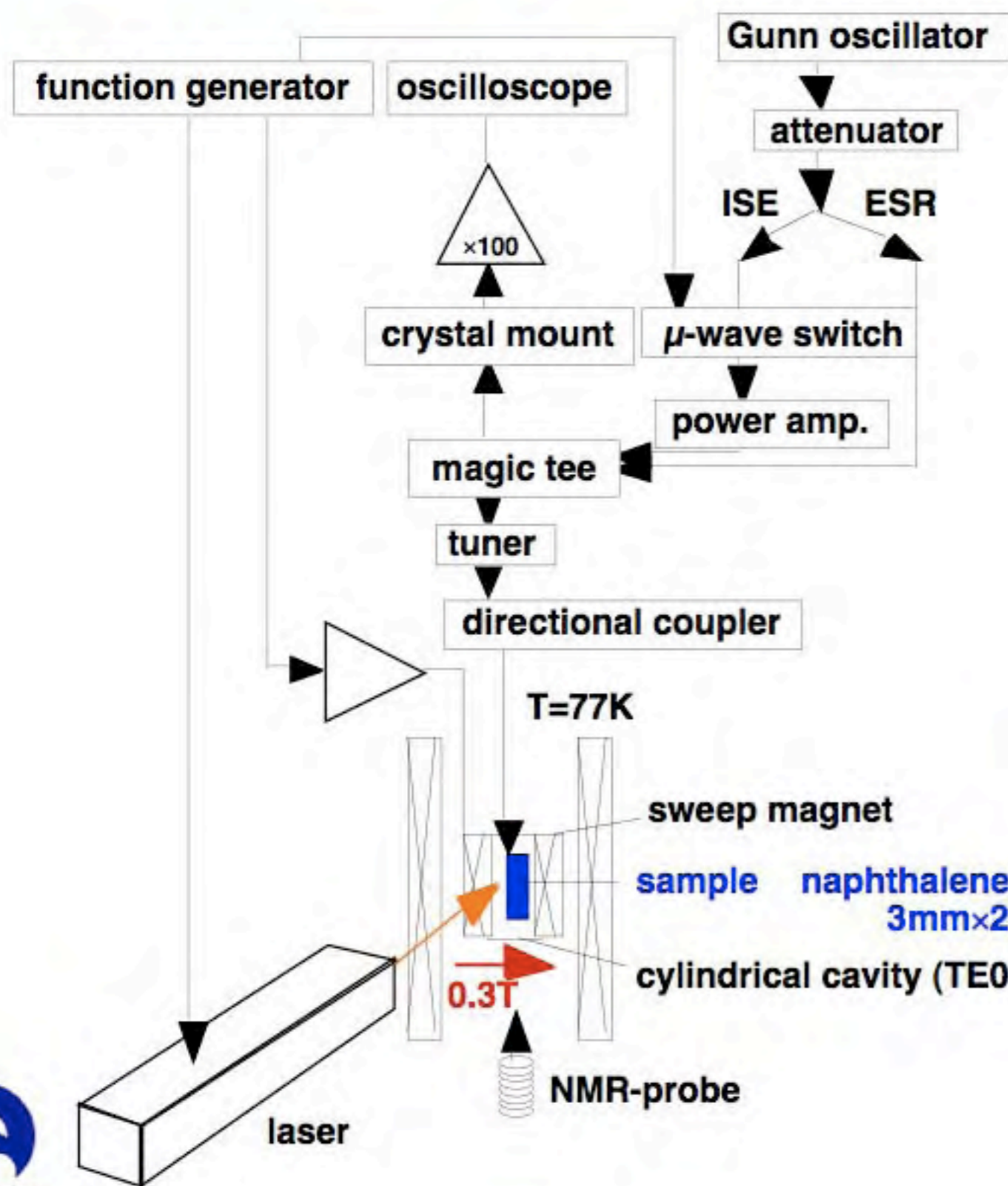
窒素温度、磁場3kGで陽子偏極率~40%

室温だと単純換算で陽子偏極率~3%

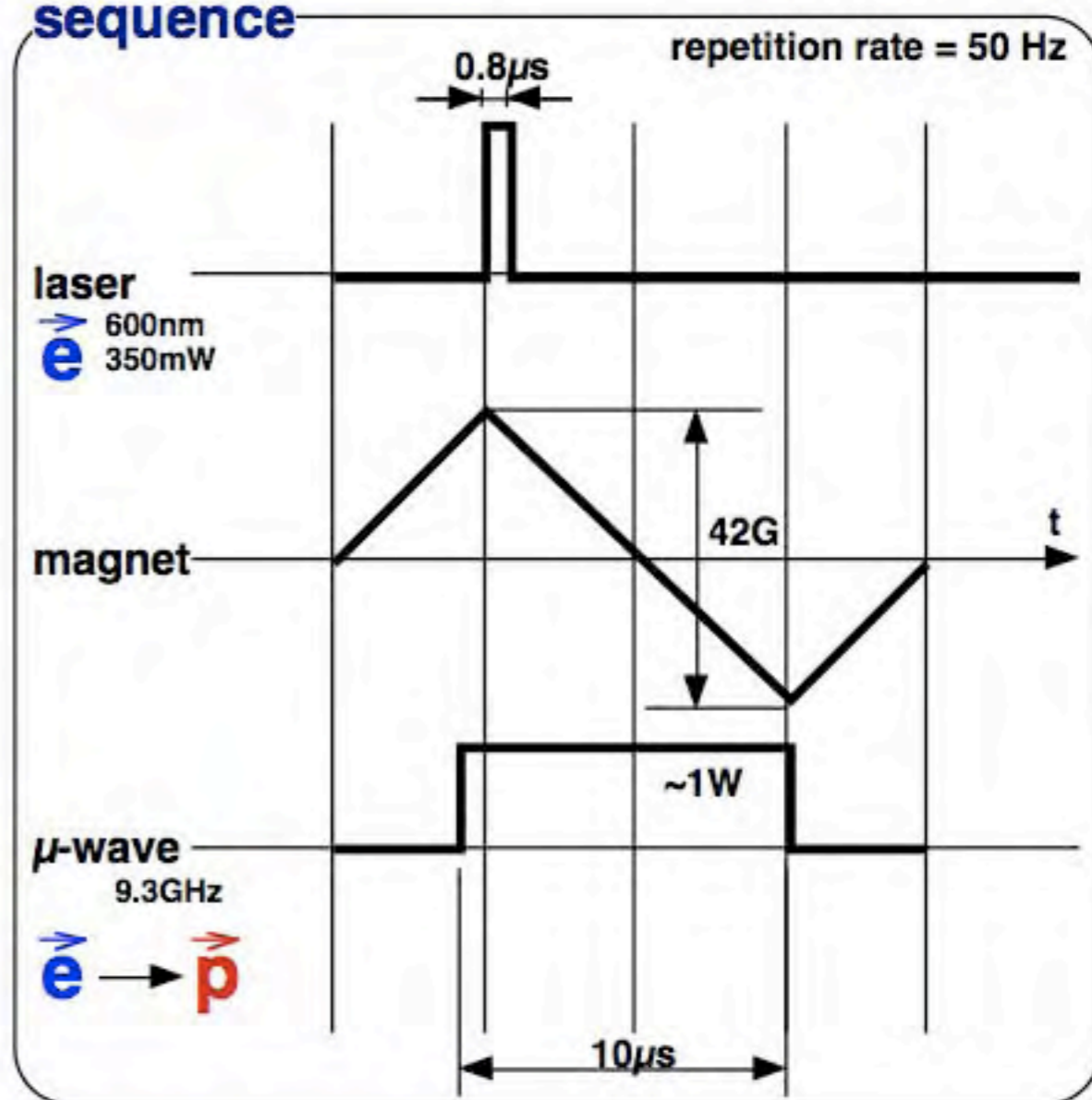


Experimental Setup

Microwave Induced Optical Nuclear Polarization

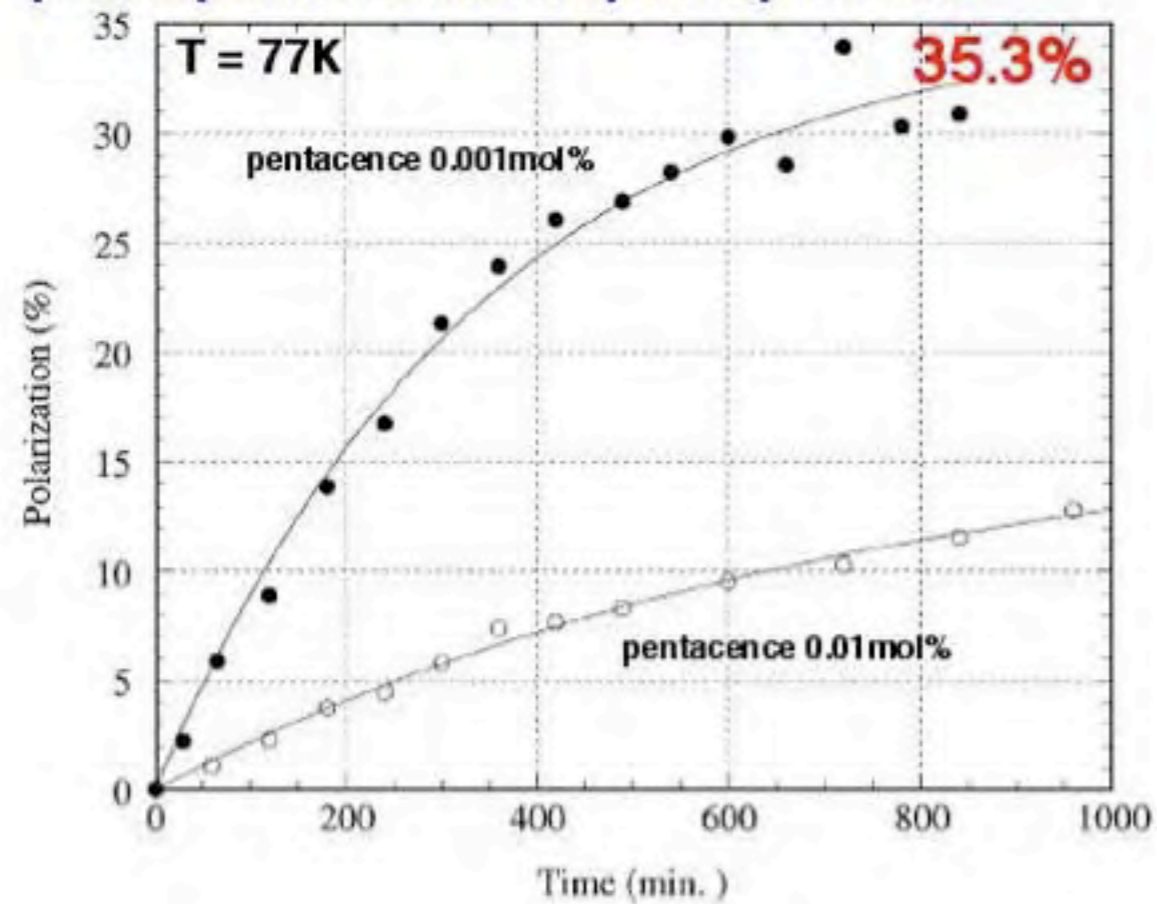


sequence

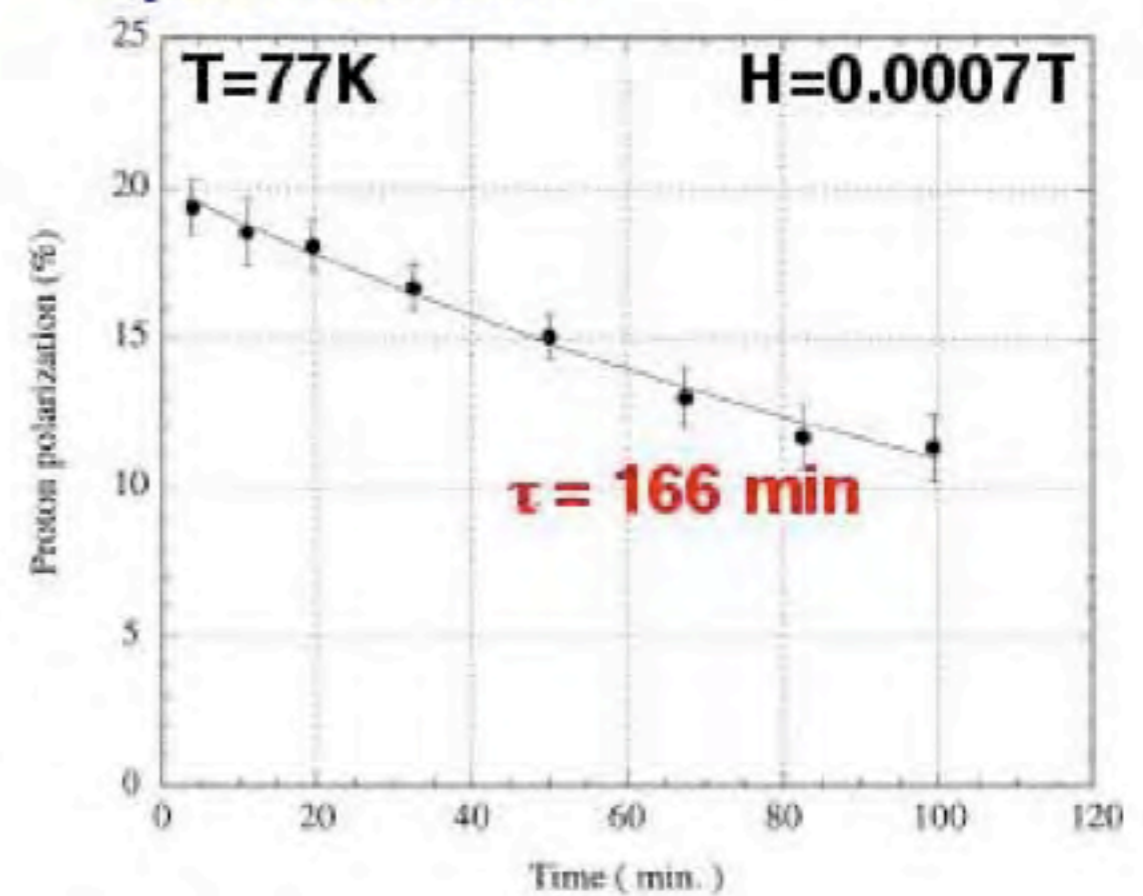


Results of MIONP

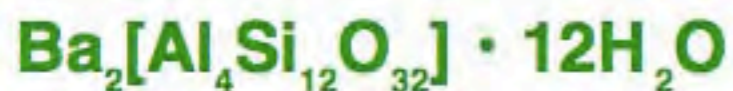
proton polarization buildup in naphthalene



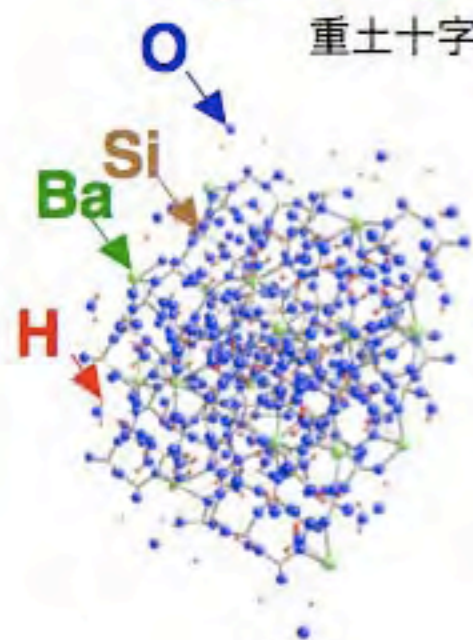
spin relaxation



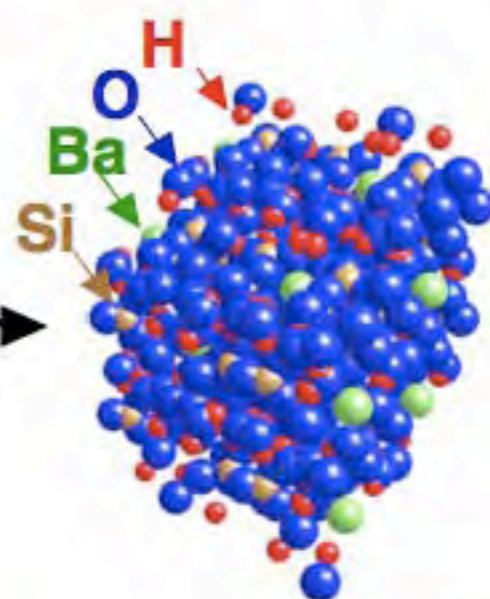
核スピンコントラスト法



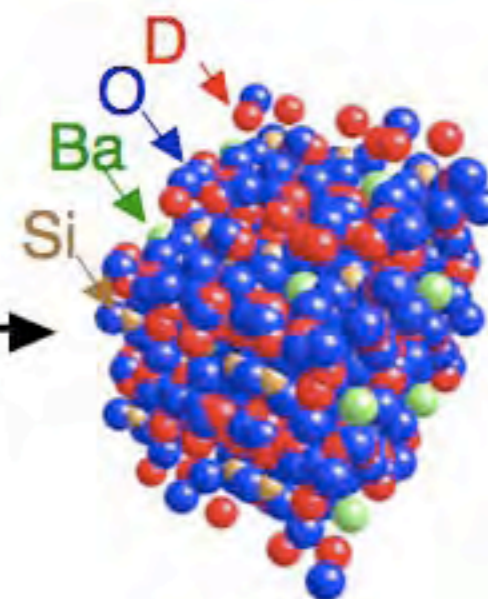
重土十字沸石 (Harmotome)



中性子像



重水素置換

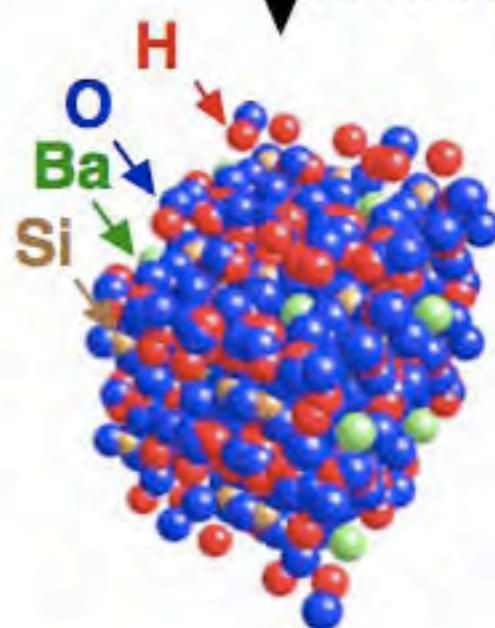
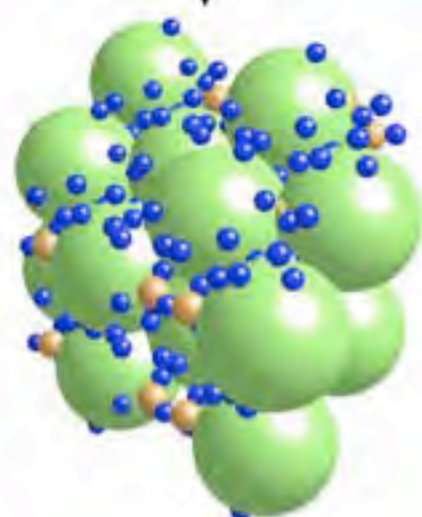


スピン偏極

スピン平行

スピン反平行

X線像



スピンコントラスト法

中性子散乱における試料陽子核偏極

非干渉性散乱成分の抑制

$$\sigma(\text{coh}) = 0.439 \text{ b}$$

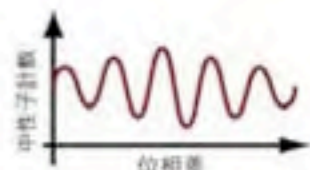
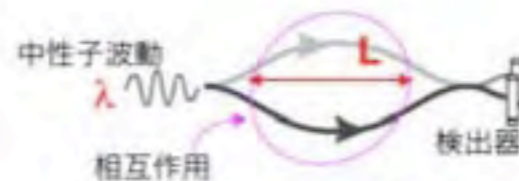
$$\sigma(\text{incoh}) = 20.052 \text{ b}$$

スピンコントラスト法の開拓

(Spin Contrast Variation)

1-2. 応用中性子光学

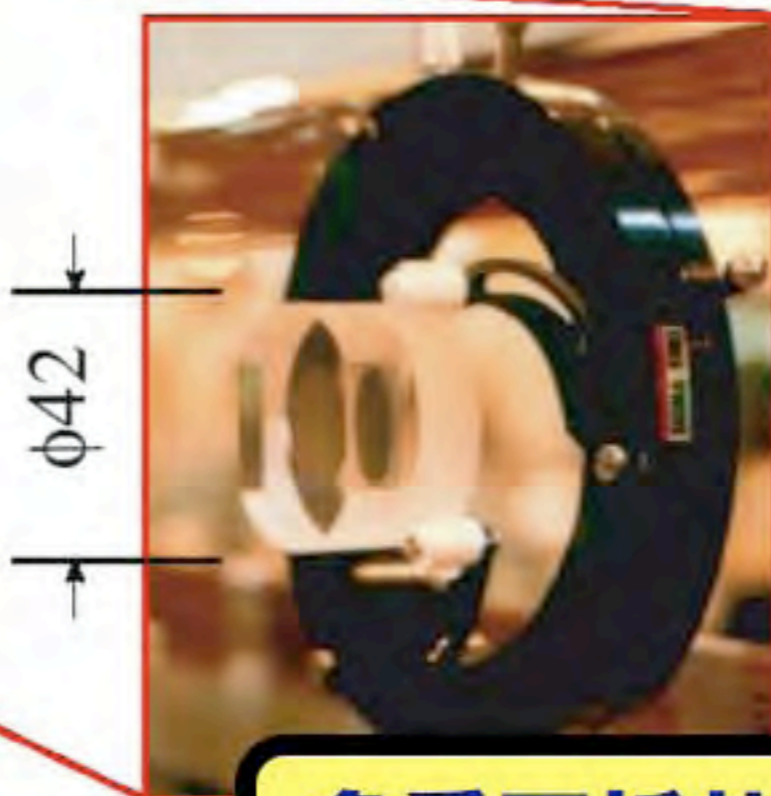
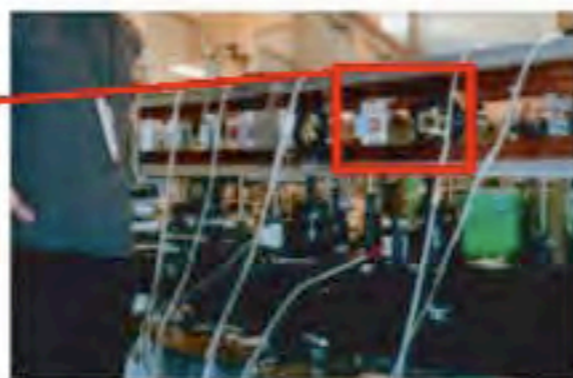
多層膜中性子干渉計の実現



$$\Delta\phi = 2\pi \frac{m\lambda L}{h^2} \Delta E$$

λ: 中性子波長
L: 相互作用する長さ
ΔE: 2経路のエネルギー差

Beam Splitting Etalon



長波長中性子を用いる大型の中性子干渉計は微小な相互作用を検出するのに有利

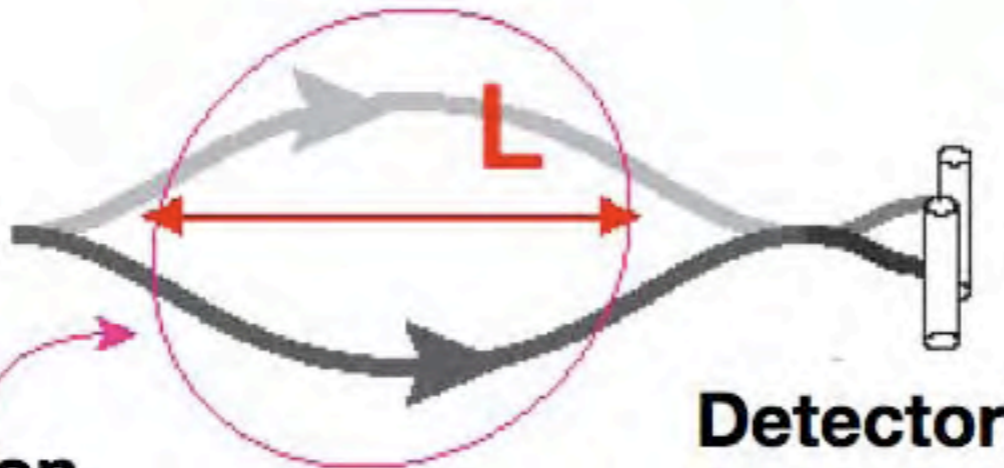
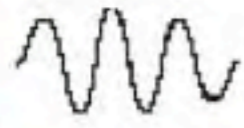
多重回折効果の桁違いの抑制



Neutron Interferometer

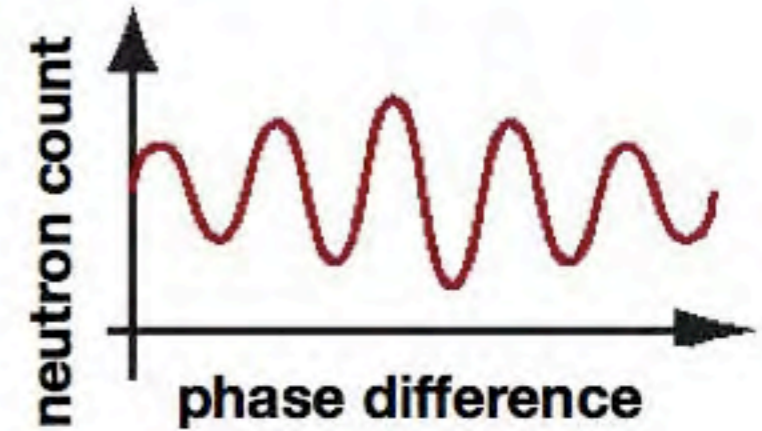
Neutron Wave

λ



Interaction

Detector



λ : neutron wavelength
 L: path length
 ΔE : energy difference

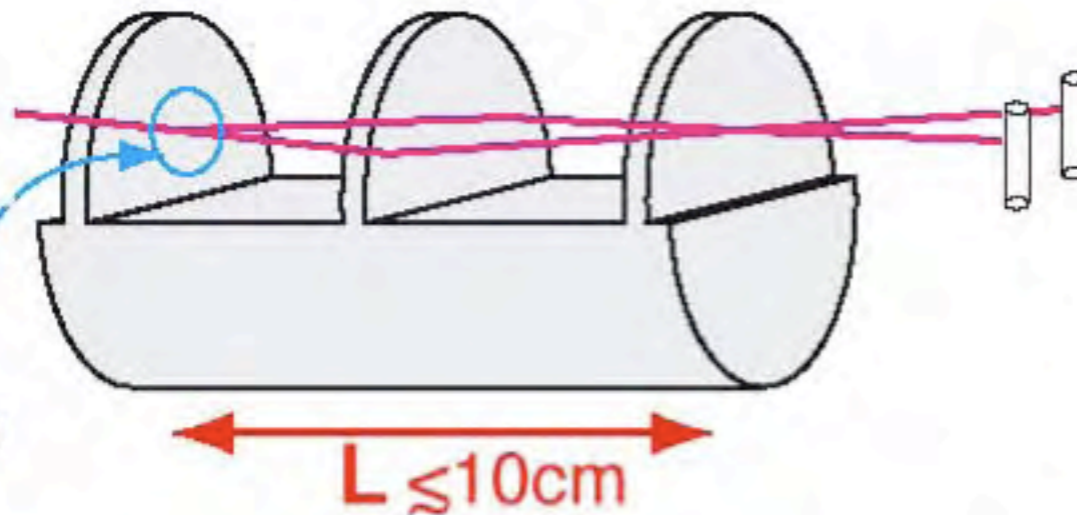
$$\Delta\phi = 2\pi \frac{m\lambda L}{h^2} \Delta E$$

Single Crystal Neutron Interferometer

thermal neutrons

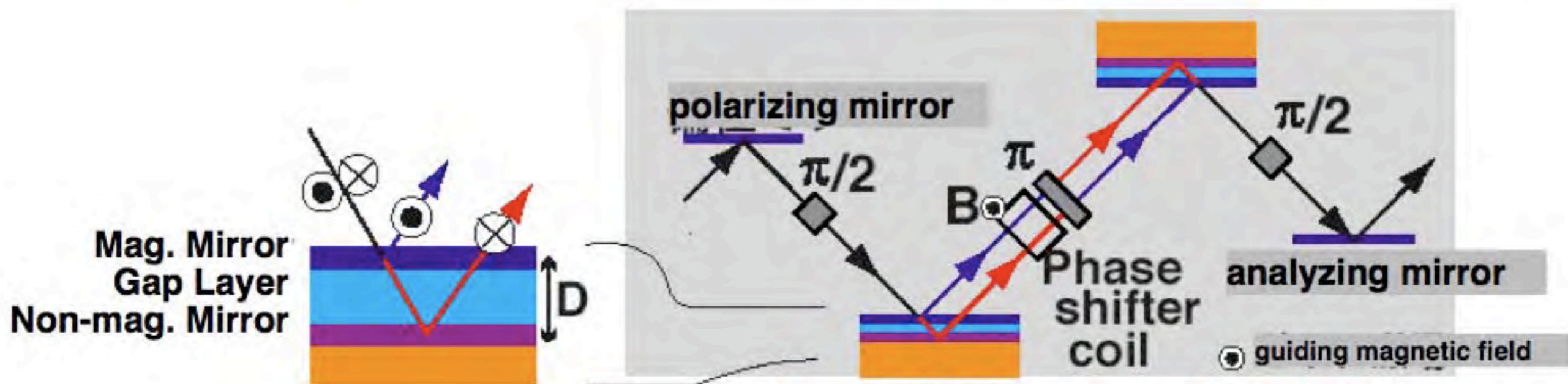
$\lambda \sim 1\text{\AA}$

lattice diffraction



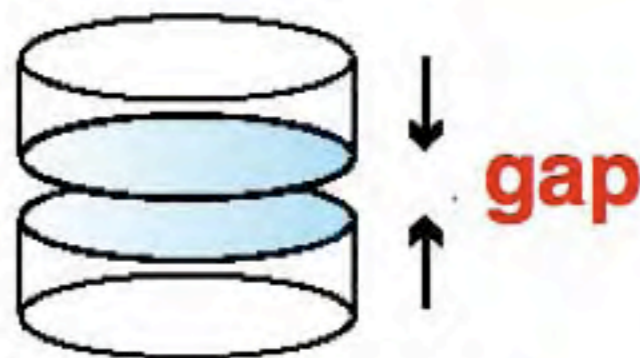
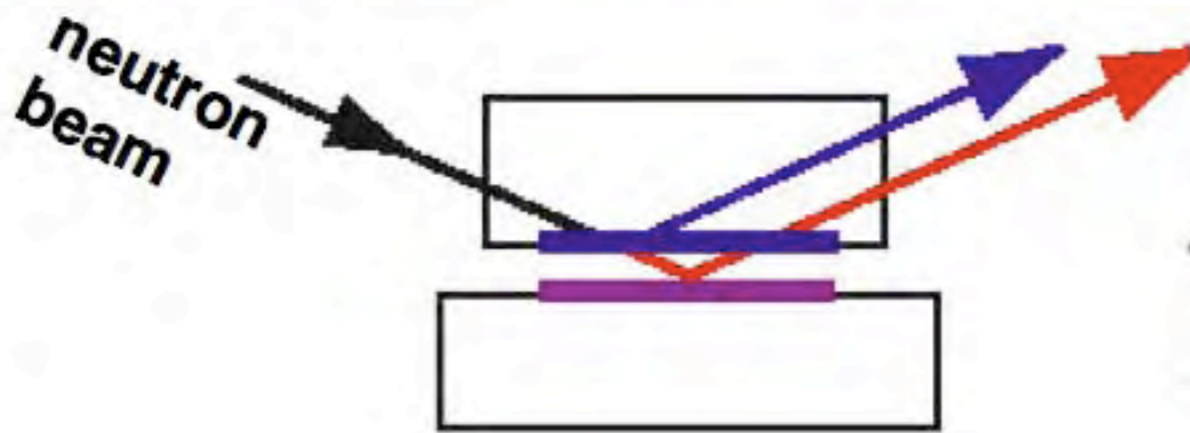
- neutron wavelength is limited by the lattice constant
- large dynamical diffraction effect
- geometrical size is limited by the availability of single crystal

Multilayer Neutron Spin Interferometer (Jamin-type)



T.Ebisawa et al., Phys. Rev. A57 (1998) 4720

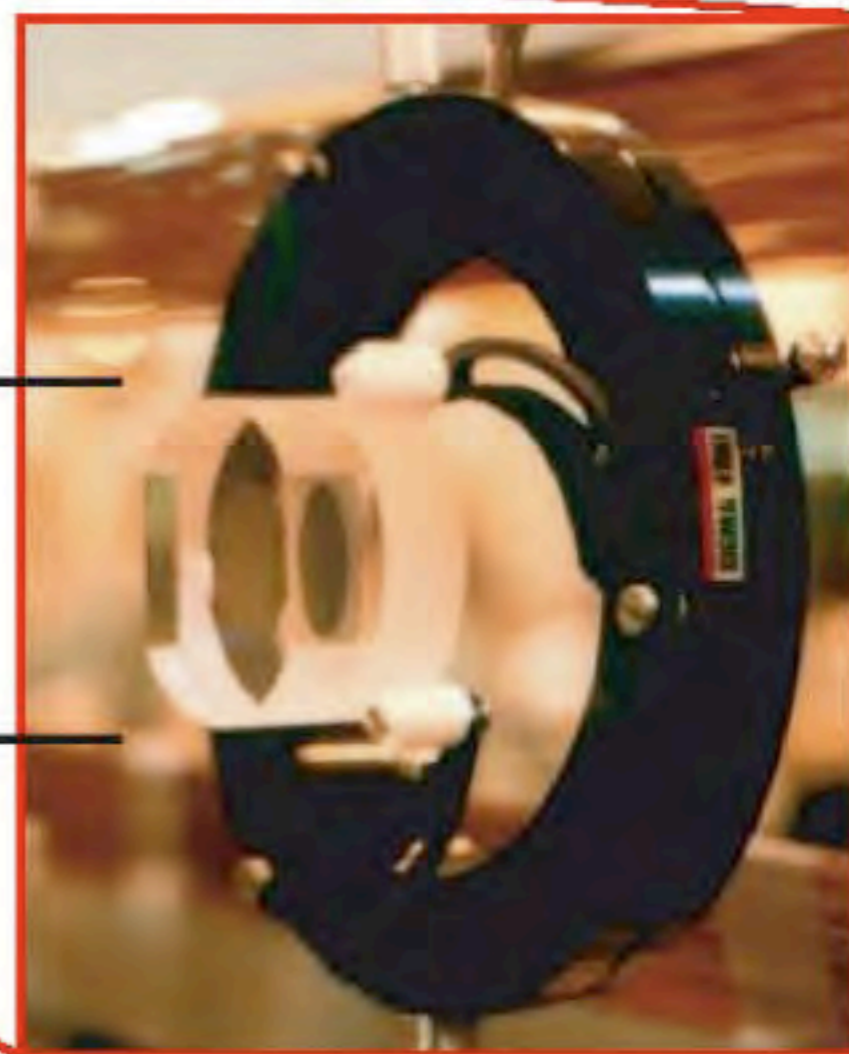
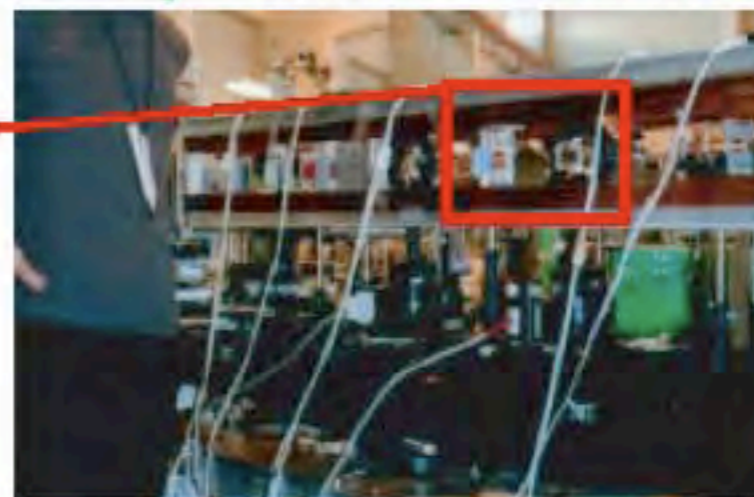
gap enlarged using etalons



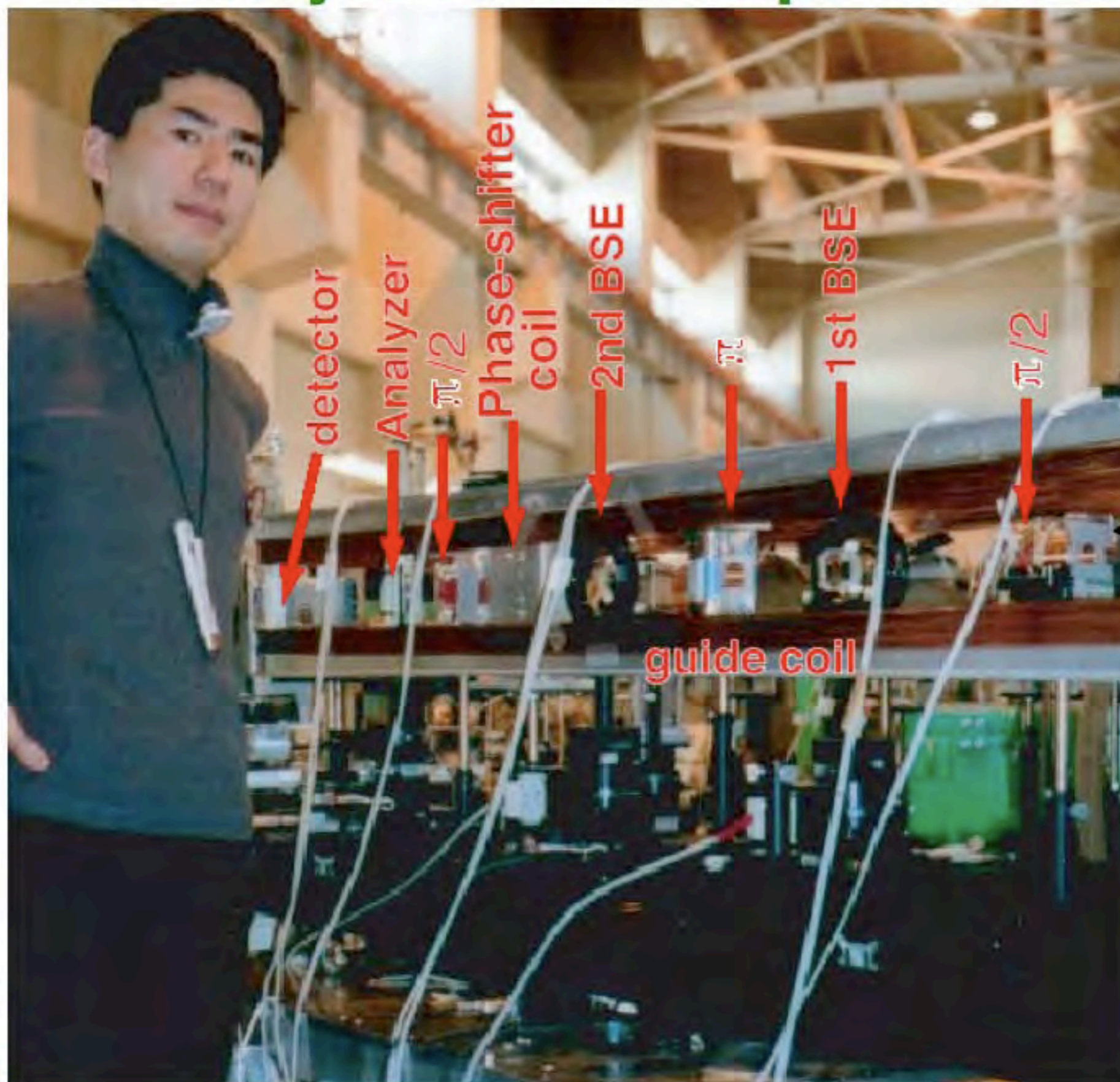
合成石英
Surface roughness RMS < 3Å
 $\lambda/150$ (~4 nm)

Beam-splitting Etalon

(The component of multilayer neutron spin interferometer)



Multilayer Neutron Spin Interferometer



neutron beam

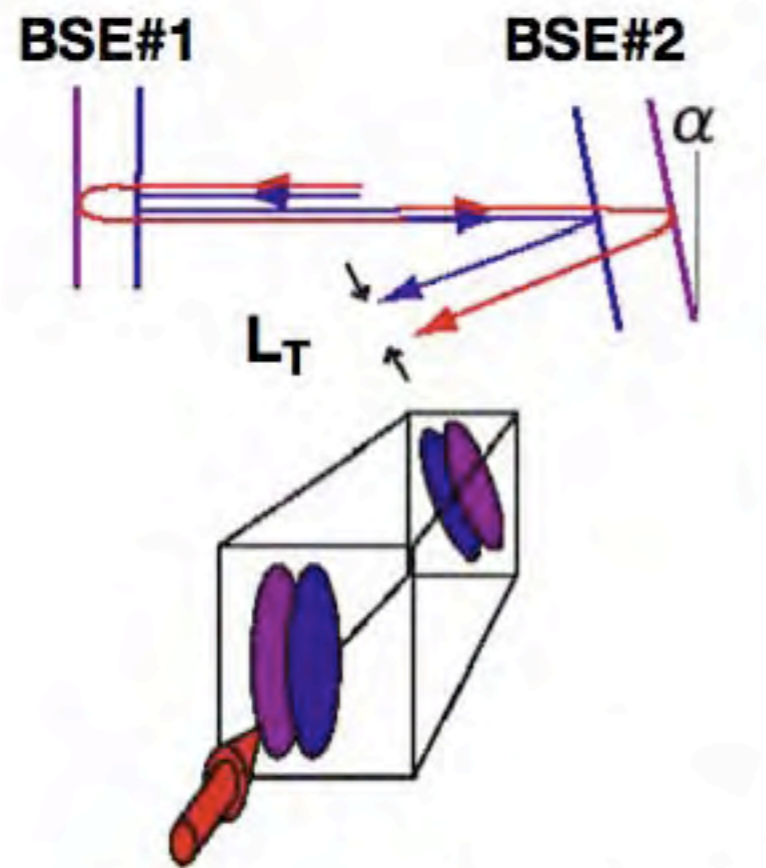
$\lambda = 8.8 \text{ \AA}$
 $\Delta\lambda/\lambda = 2.4\%$

θ -goniometer resolution
500 pulses/degree
tilting alignment precision
0.006 degree

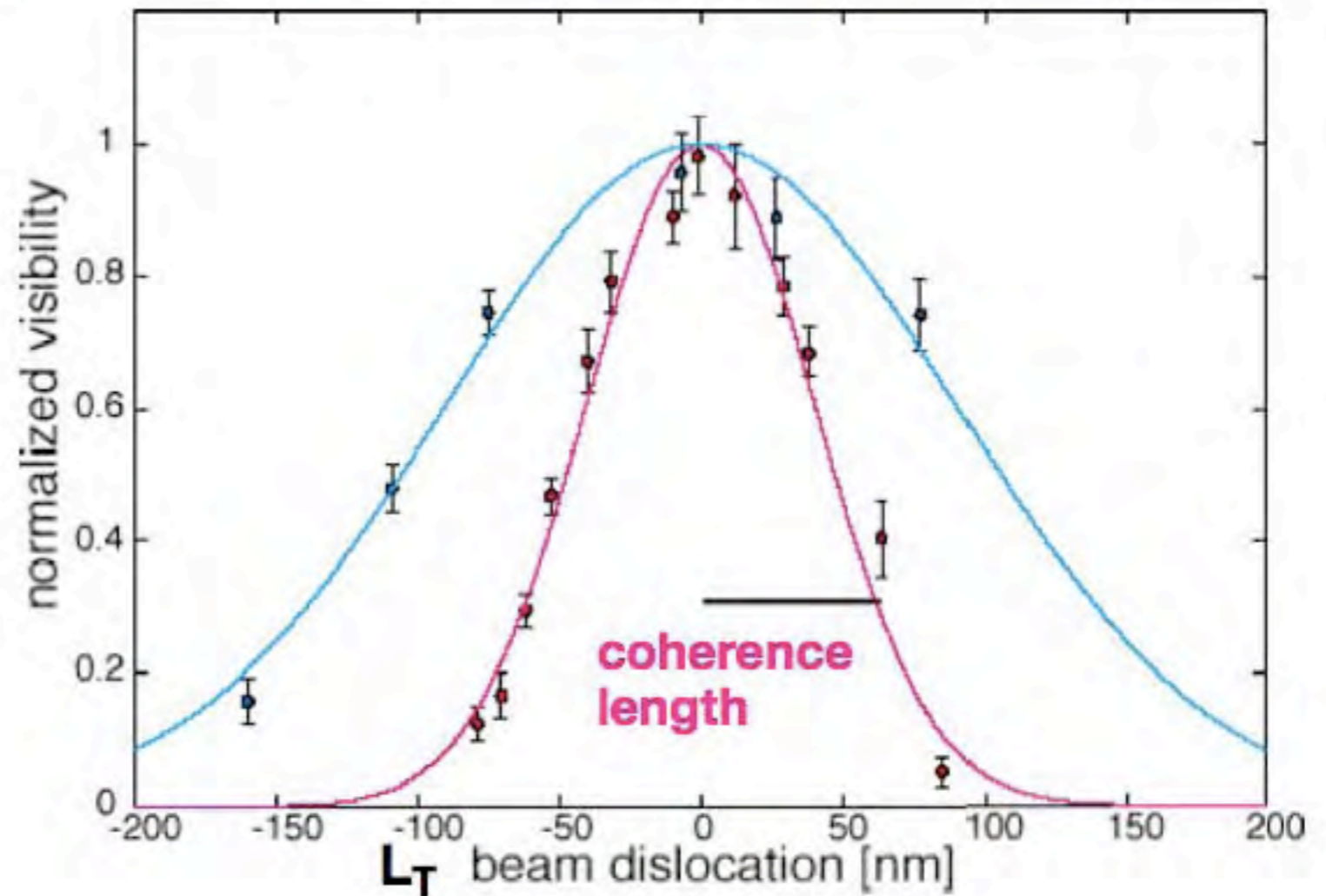
Installed at MINE2
JRR-3M JAERI

Measurement of Transverse Coherence Length

visibility (contrast of interference pattern) $\exp(-\sigma_T^2 L_T^2/2)$



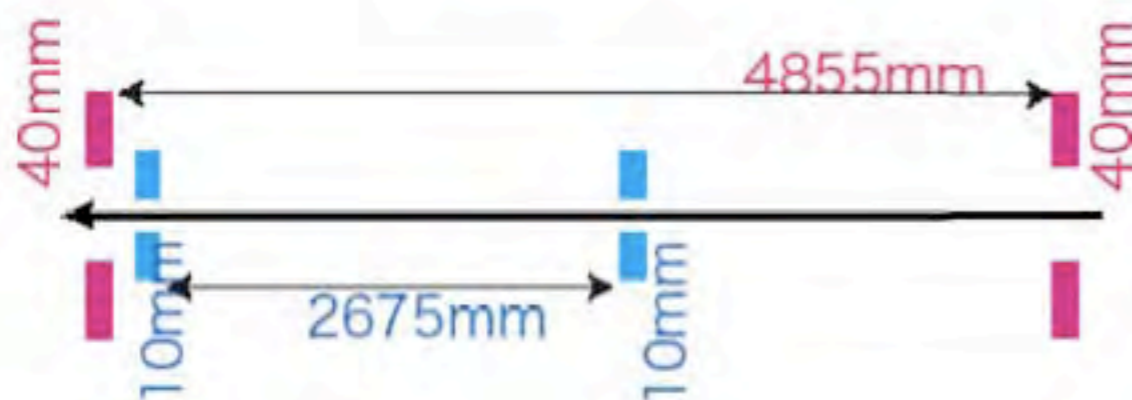
σ_T : beam divergence
 L_T : beam separation



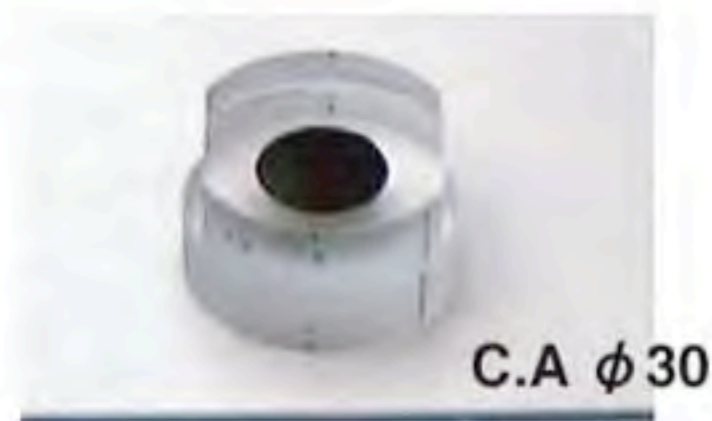
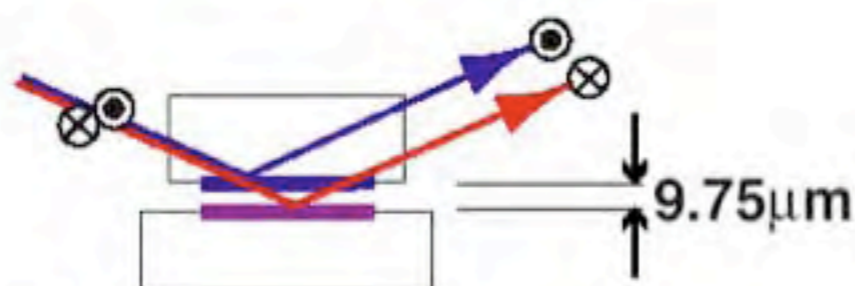
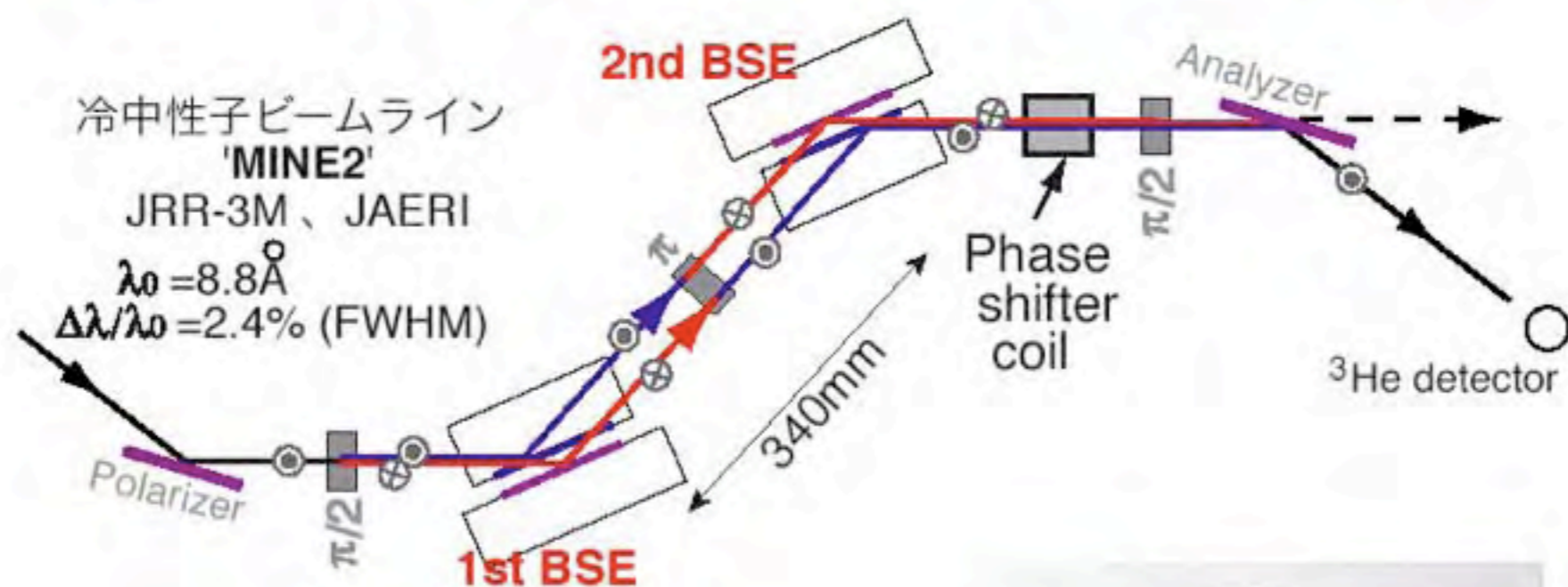
transverse coherence length

estimation : 58.9 nm
 measurement : 57 ± 2 nm

estimation : 129.8 nm
 measurement : 127 ± 10 nm

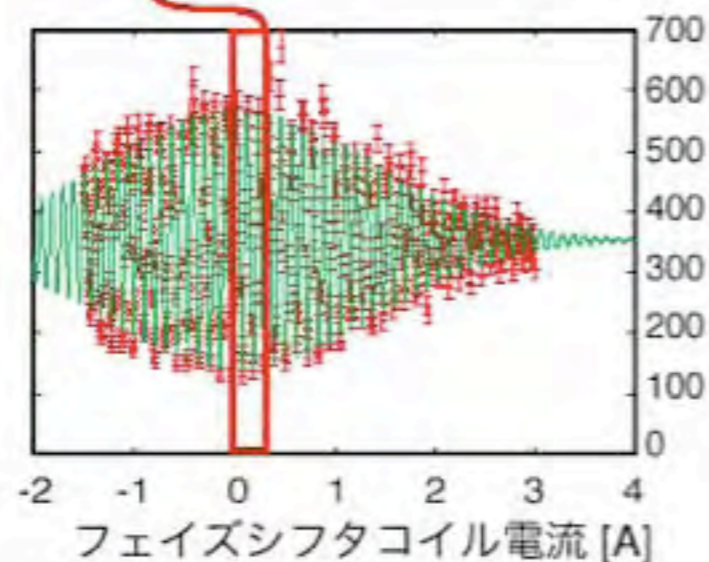
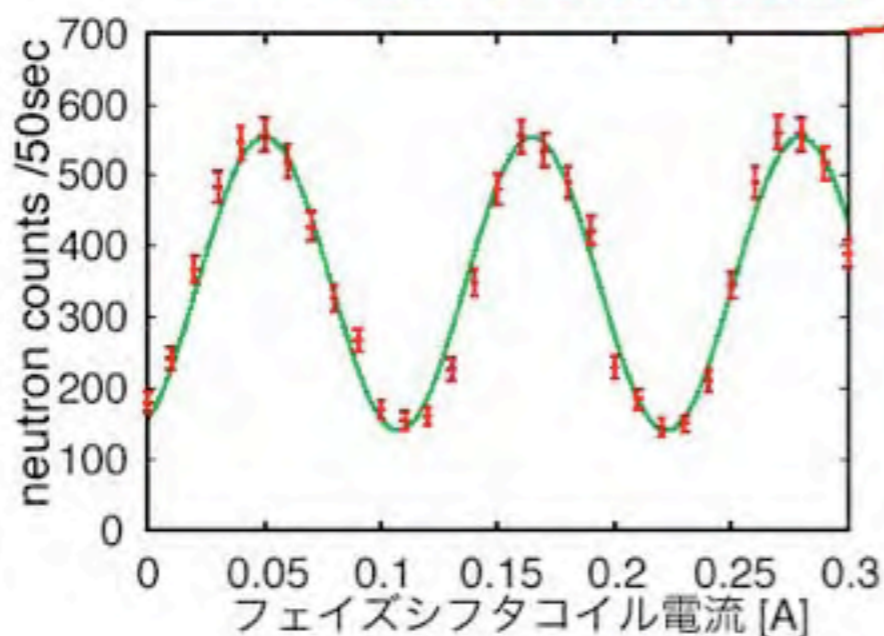


多層膜中性子ミラーを用いた中性子スピン干渉計

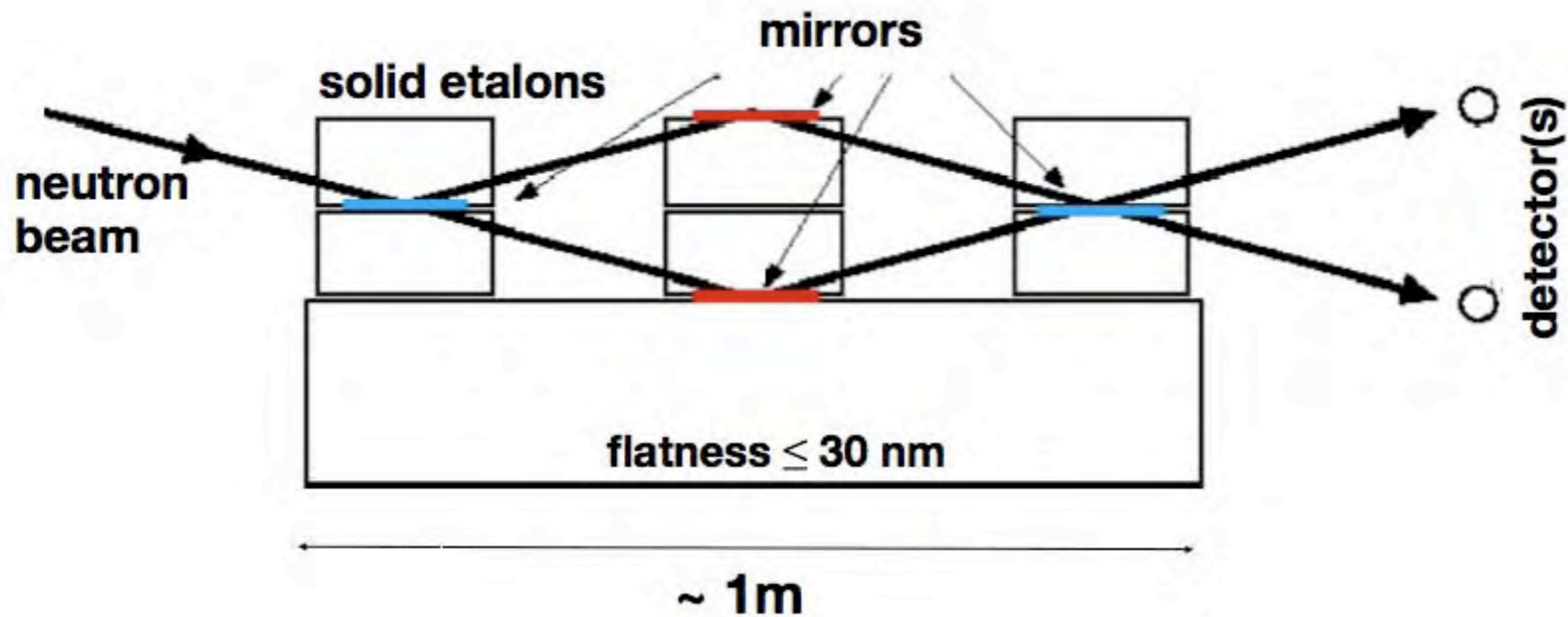


結果

コントラスト60%の干渉縞



Multilayer Neutron Interferometer (Mach-Zehnder-type)



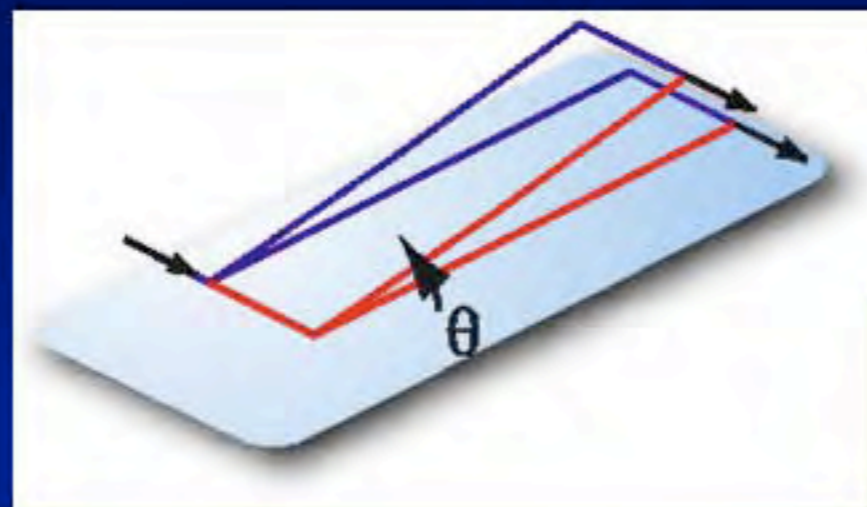
1 m^2



**Sensitivity to post-Newtonian Terms
(General Relativistic Effects of Earth Gravity)**

微弱相互作用

相對論的補正項(電磁場あり)



$$\Delta\phi_g = -2\pi m^2 \frac{g}{\hbar^2} \lambda A \sin \theta$$

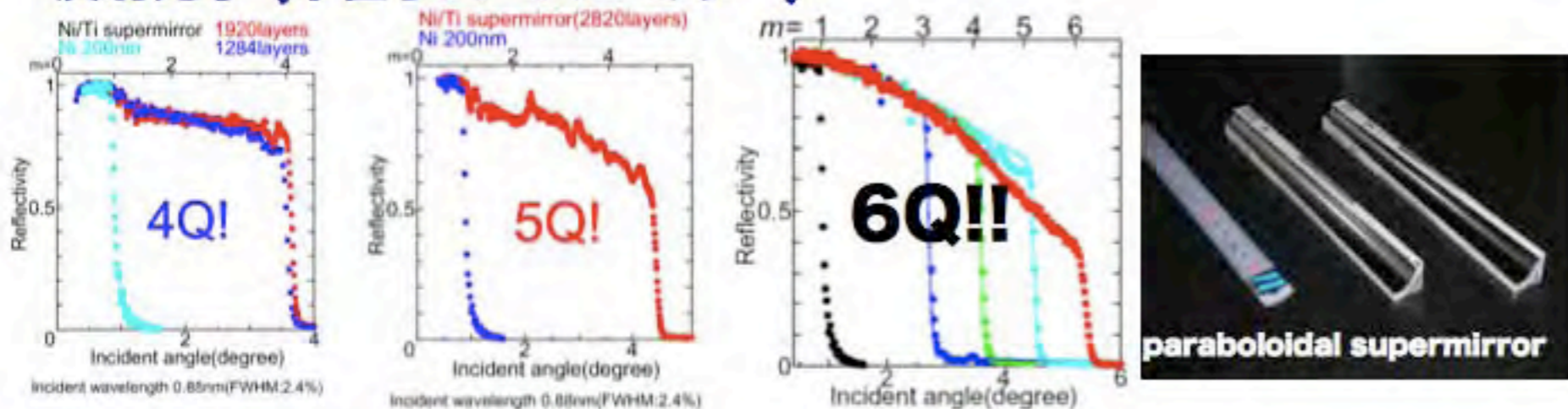
λ : 中性子波長
 A : 経路が囲む面積
 θ : 装置の傾き

Sagnac term

$$\begin{aligned}
 H = & mc^2 + \frac{\mathbf{p}^2}{2m} + m\phi - \omega \cdot \mathbf{L} - \omega \cdot \mathbf{S} - \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} \\
 & + \frac{1}{c^2} \left[-\frac{\mathbf{p}^4}{8m} + \frac{m\phi^2}{2} + \frac{3(\mathbf{p} \cdot \nabla\phi)}{2m} - \frac{3GM(\mathbf{L} \cdot \mathbf{S})}{2mr^3} \right. \\
 & \quad \left. - \frac{4GMR^2 \omega \cdot (\mathbf{L} + \mathbf{S})}{5r^3} - \frac{6GMR^3 \mathbf{S} \cdot (\mathbf{r} \times (\mathbf{r} \times \boldsymbol{\omega}))}{5r^5} \right. \\
 & \quad \left. - \phi(\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}) + \frac{(\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}) \mathbf{p}^2}{2m^2} + \frac{c\boldsymbol{\mu} \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{p})}{2m} \right]
 \end{aligned}$$

中性子光学 (1990年代後半から2000年代前半)

反射光学 (中性子スーパーミラー)

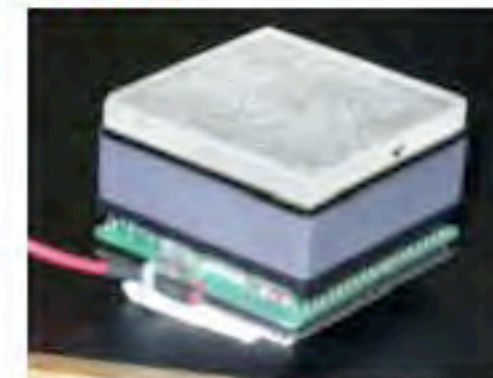


画像検出器

RPMT



FPPMT

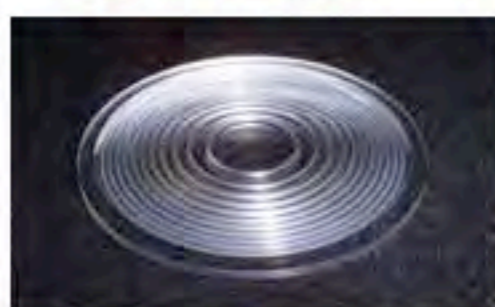


物質界面屈折光学

Biconcave



Fresnel-shape



Coaxial Double Biconcave



Microprism



磁気屈折光学

Superconducting



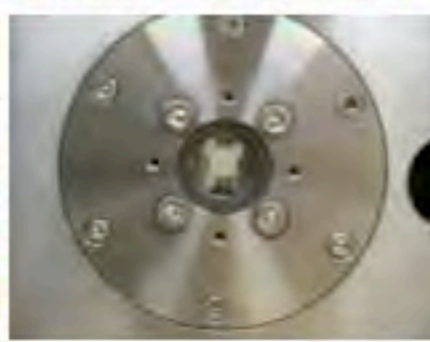
Permanent



Pulsed



Variable Permanent



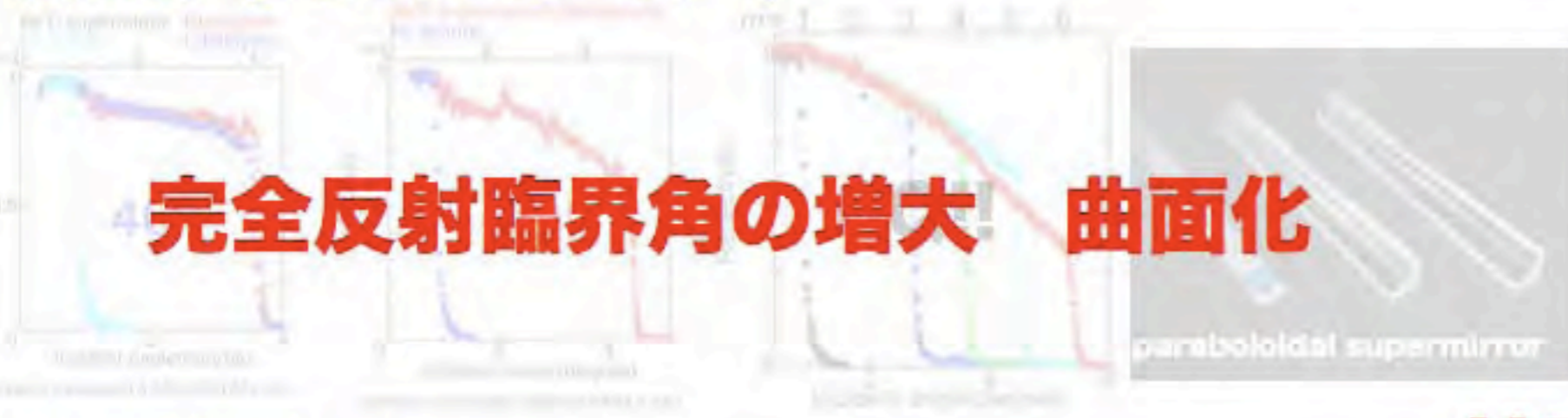
干渉光学

Beam Splitting Etalon



中性子光学 (1990年代後半から2000年代前半)

反射光学 (中性子スーパーミラー)

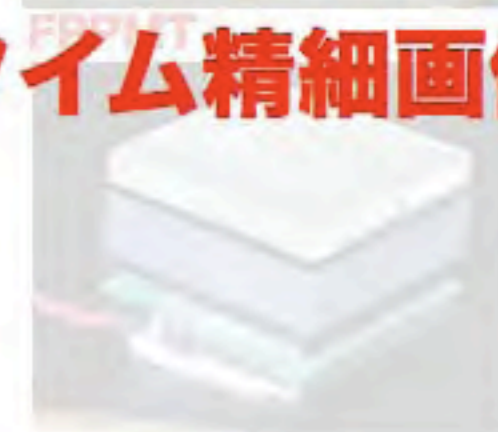


完全反射臨界角の増大 曲面化

画像検出器



リアルタイム精細画像



物質界面屈折光学



屈折光学の実用

磁気屈折光学



精密なビーム制御

干渉光学



多重回折効果の克服

中性子光学 (2000年代後半)

反射光学 (中性子スーパーミラー)



完全反射臨界角の60!! 曲面化

画像検出器

RPMT



FBPMT

リアルタイム精細画像



物質界面屈折光学

Biconcave

Fresnel-shape

Coaxial Double Biconcave

Microprism

大口径化

精密化

磁気屈折光学

Superconducting

Permanent

Pulsed

Variable Permanent

精密なビーム制御

干渉光学

Down Scanning Etalon

多重回折効果の克服

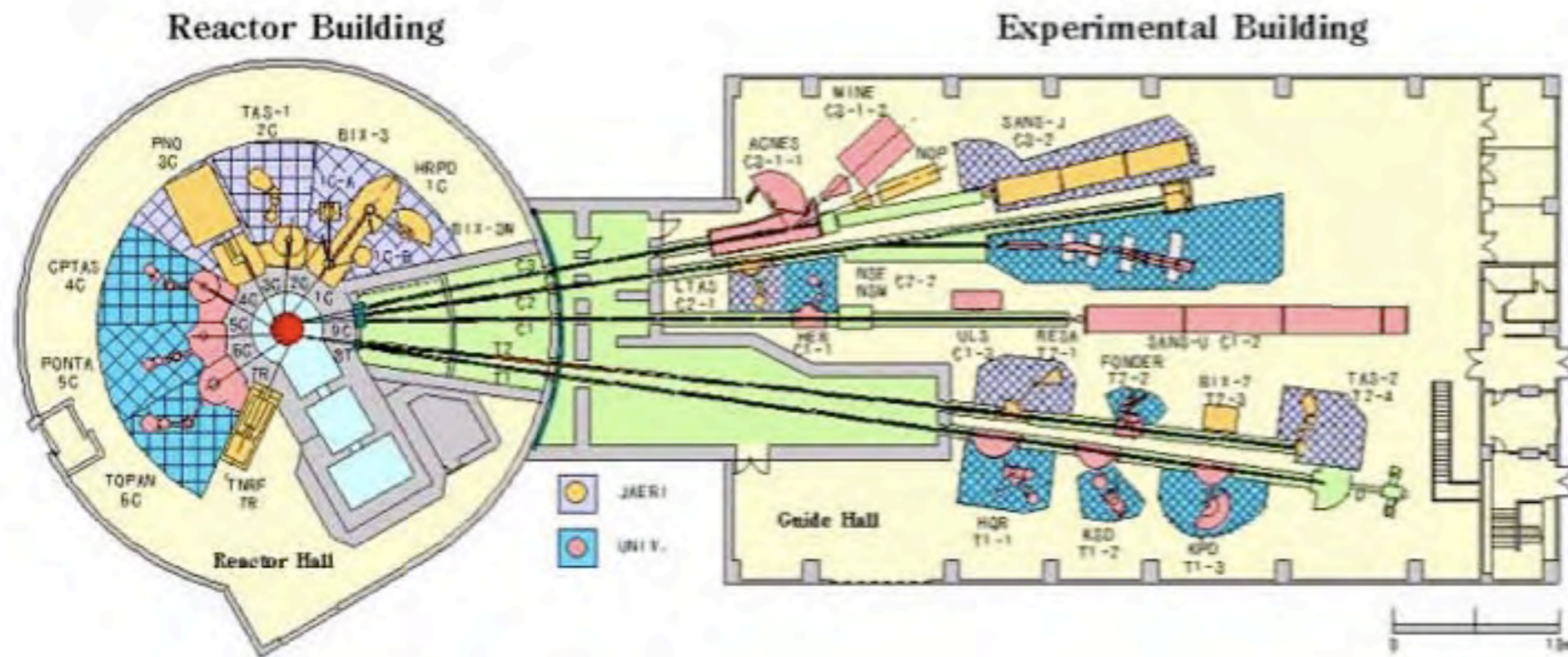
(2007/03/20)

(中性子光学による基礎物理学)

(平成19年度学術創成科研費ヒアリング) (Tokyo)

page 134

中性子光学の応用実績

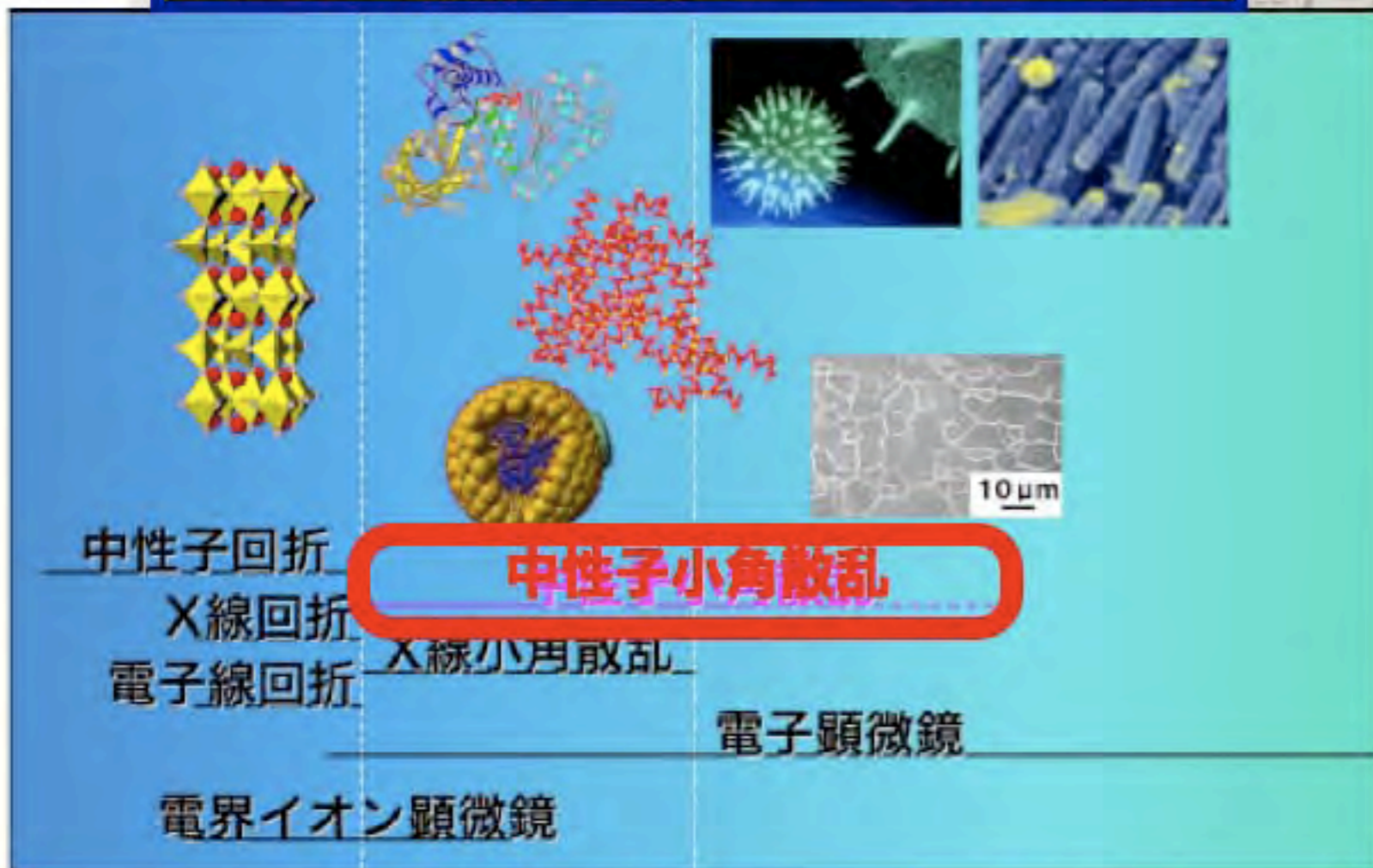


JRR-3M Beam Experimental Facilities 2002.5



中性子光学の応用実績

観測可能領域をマイクロメートルまで拡大



10^{-11}m
(=0.1Å)

10^{-9}m
(=10Å)

10^{-7}m
(=0.1μm)

10^{-5}m
(=10μm)

10^{-3}m
(=1mm)

集光型小角散乱(100倍を超える利用効率向上)



中性子光学の応用実績

観測可能領域をナノメートルからマイクロメートルまで拡大

2-250倍

(2007/03/20)

(中性子光学による基礎物理学)

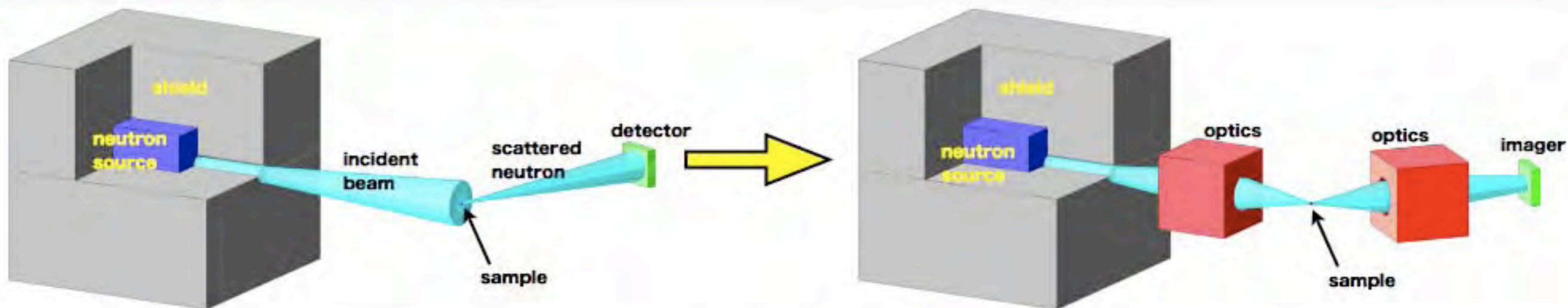
(平成19年度学術創成科研費ヒアリング) (Tokyo)

page 138

中性子光学による基礎物理学
Neutron Optics and Physics



1-2. 応用中性子光学



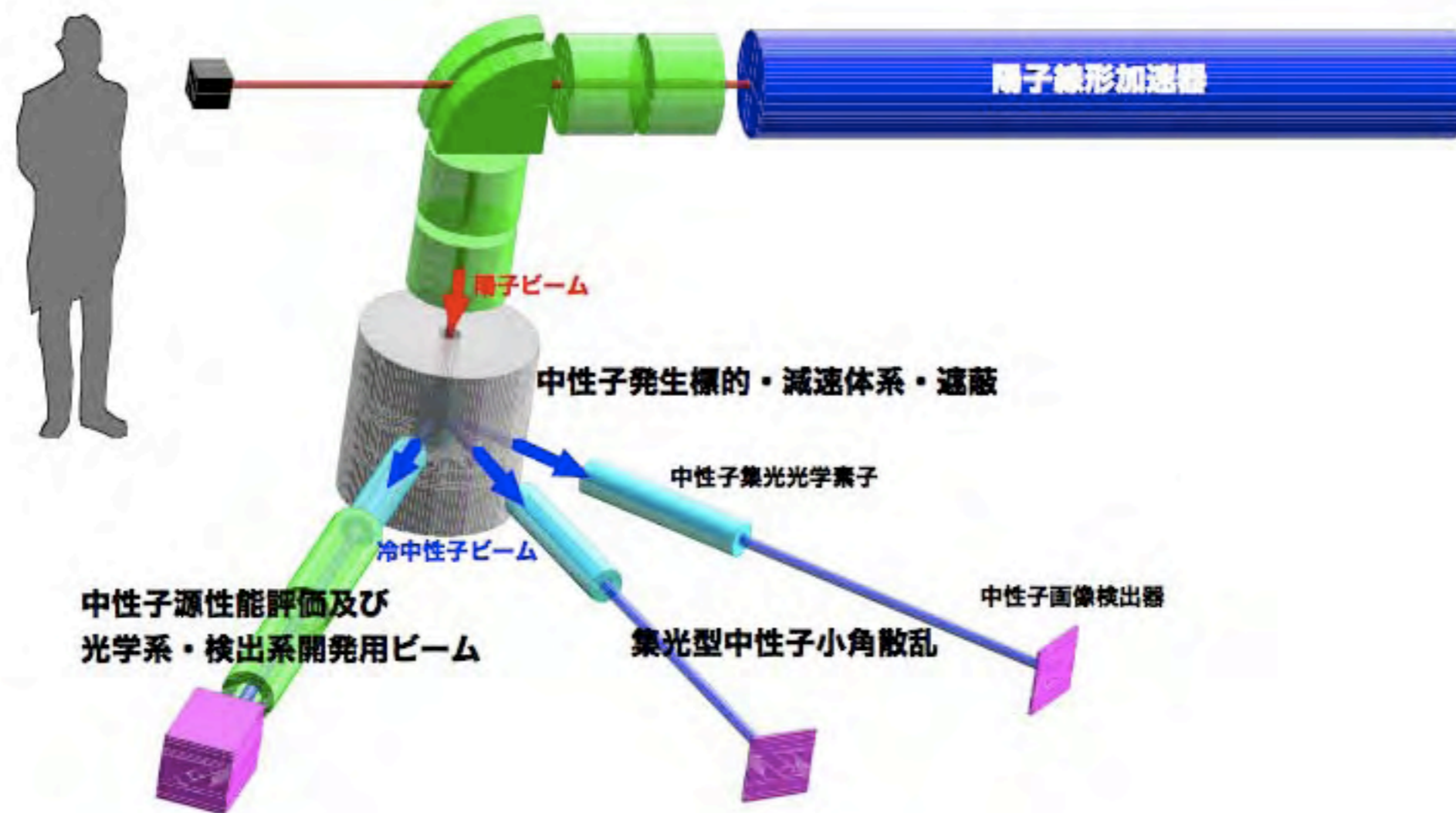
	従来		中性子光学
中性子利用効率	低	→	高
大規模中性子施設	○	→	●
中小規模中性子源	×	→	○

当面の応用先

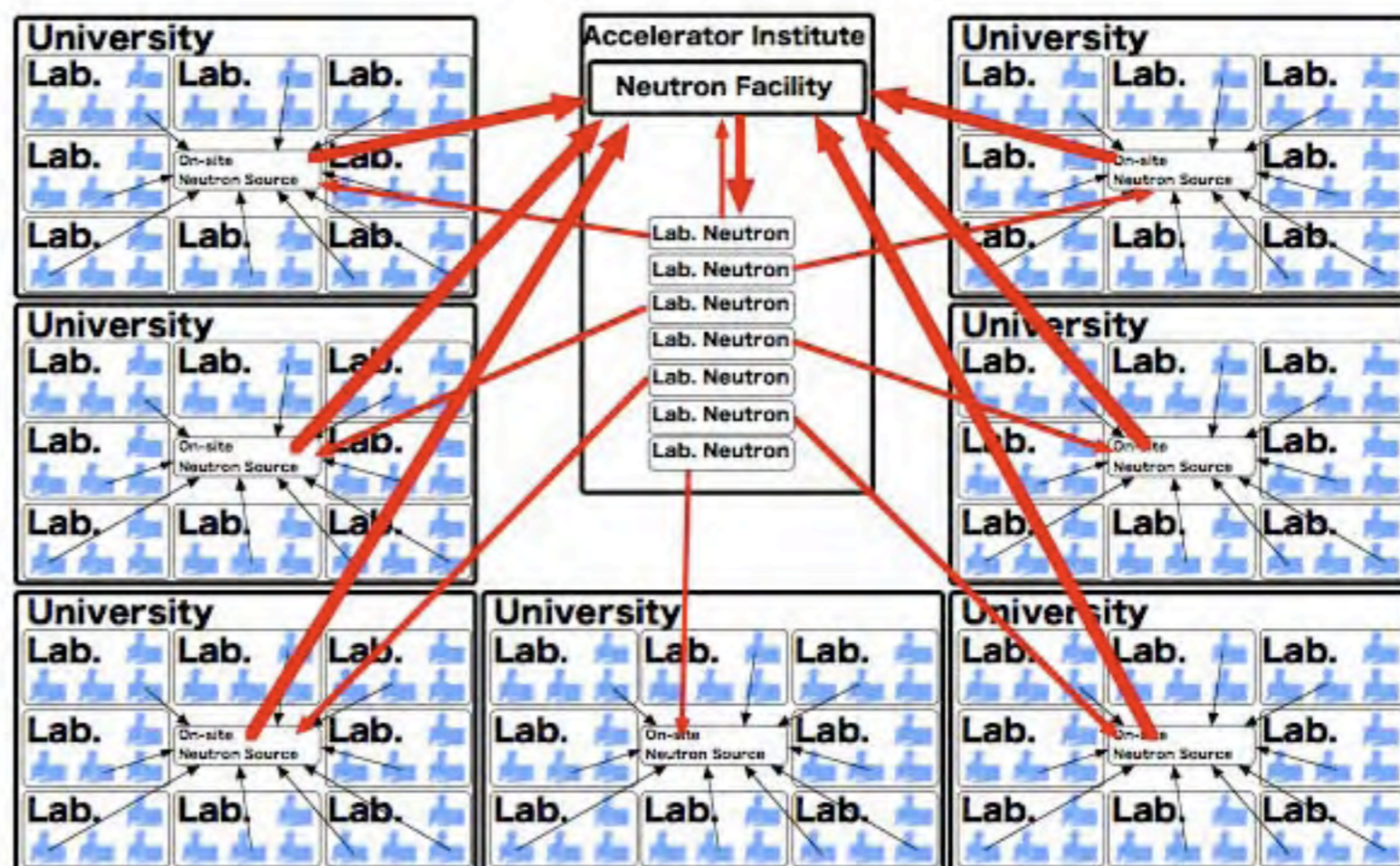
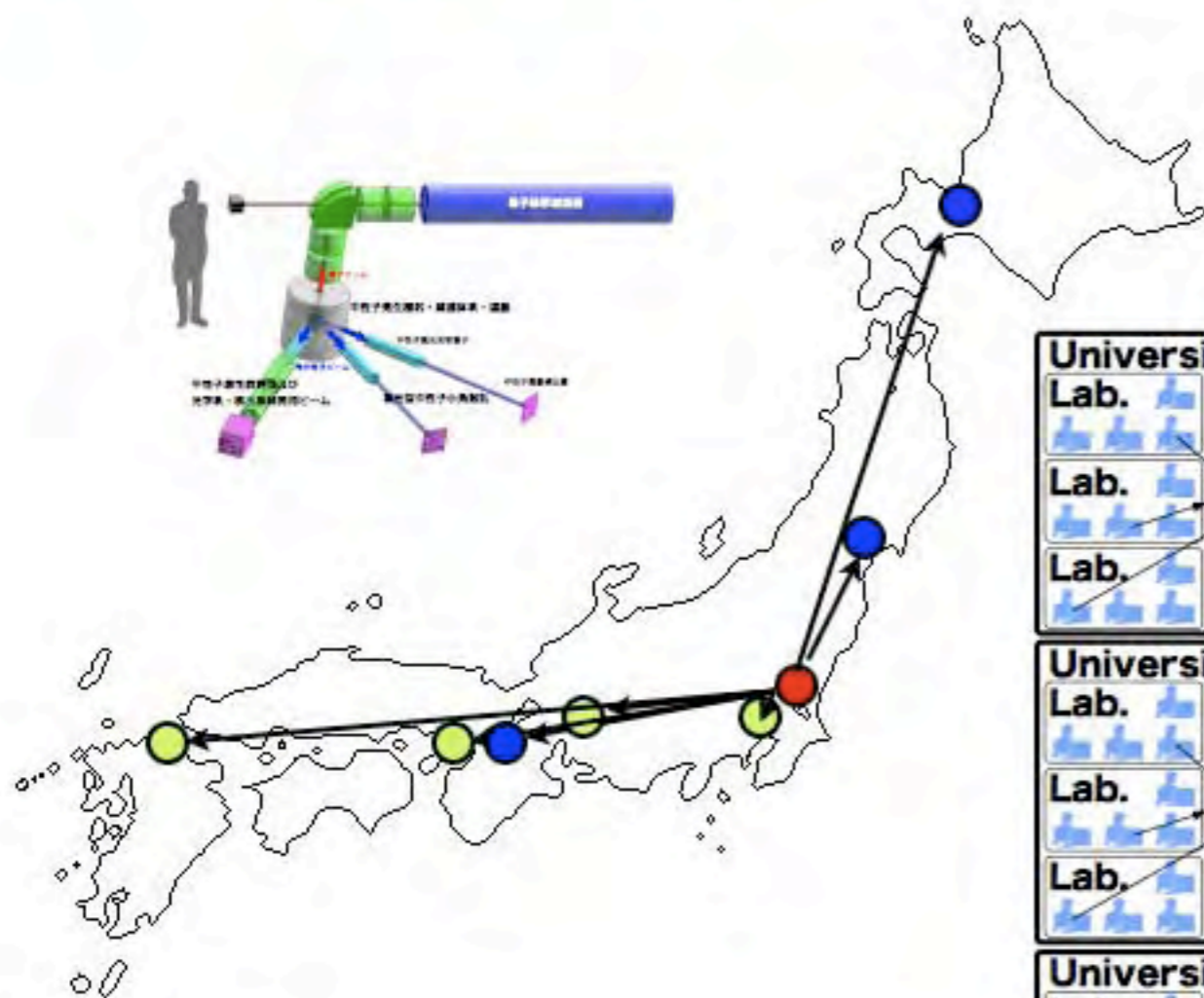
新たに開拓された可能性



1-2. 応用中性子光学



1-2. 応用中性子光学



利用の機会が増え、長期占有を可能とすることにより、先駆的・革新的な新しいアイデア段階の研究を育むことも可能とする。



THE END

