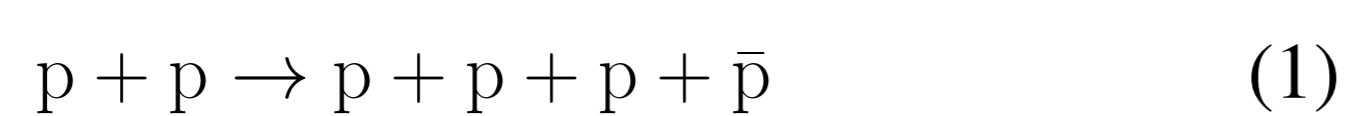




反粒子, 反物質

反粒子とは、粒子と質量, 寿命, スピンや電磁的な物理量の大きさが同じですが、電磁的な物理量の符号や、バリオン数, レプトン数, ストレンジネスなどの量子数の符号が反対の粒子です。反粒子は対となる粒子と出会うと互いに消滅し(対消滅), エネルギーになるという特徴があります。

Dirac が 1931 年にその 3 年前に自ら導いた電子(e^-)の相対論的波動方程式(Dirac 方程式)に基き「反」電子の存在, 電子・「反」電子対の生成と消滅を予言し, 1932 年に Anderson によって宇宙線から電子と質量が同じで正の電荷を持つ粒子「反」電子 = 陽電子(e^+)が発見されたことで, 反粒子の存在が知られるようになりました。陽子(p)の反粒子, 反陽子(\bar{p})は, 1955 年に Chamberlain, Segré, Wiegand, Ypsilantis らがアメリカ, バークレーの加速器 Bevatron を使って 6.2 GeV の陽子を Cu 標的にぶつけ, Cu 原子核を構成する核子との反応, 例えば陽子同士の場合,



によって初めて生成されています。

下の表は現在までに見付かった反粒子 / 反物質の一覧です。陽電子以外は加速器で作られています。

| | | |
|--------|-----------------------|-------------|
| 1932 年 | e^+ | 陽電子 |
| 1955 年 | \bar{p} | 反陽子 |
| 1956 年 | \bar{n} | 反中性子 |
| 1958 年 | $\bar{\Lambda}$ | 反ラムダ粒子 |
| 1965 年 | \bar{d} | 反重陽子 |
| 1971 年 | ${}^3\bar{\text{He}}$ | 反ヘリウム 3 原子核 |
| 1975 年 | \bar{t} | 反三重陽子 |
| 1995 年 | $\bar{\text{H}}$ | 反水素原子 |
| 2009 年 | ${}^3\bar{\text{H}}$ | 反ハイパー三重陽子 |
| 2011 年 | ${}^4\bar{\text{He}}$ | 反ヘリウム 4 原子核 |

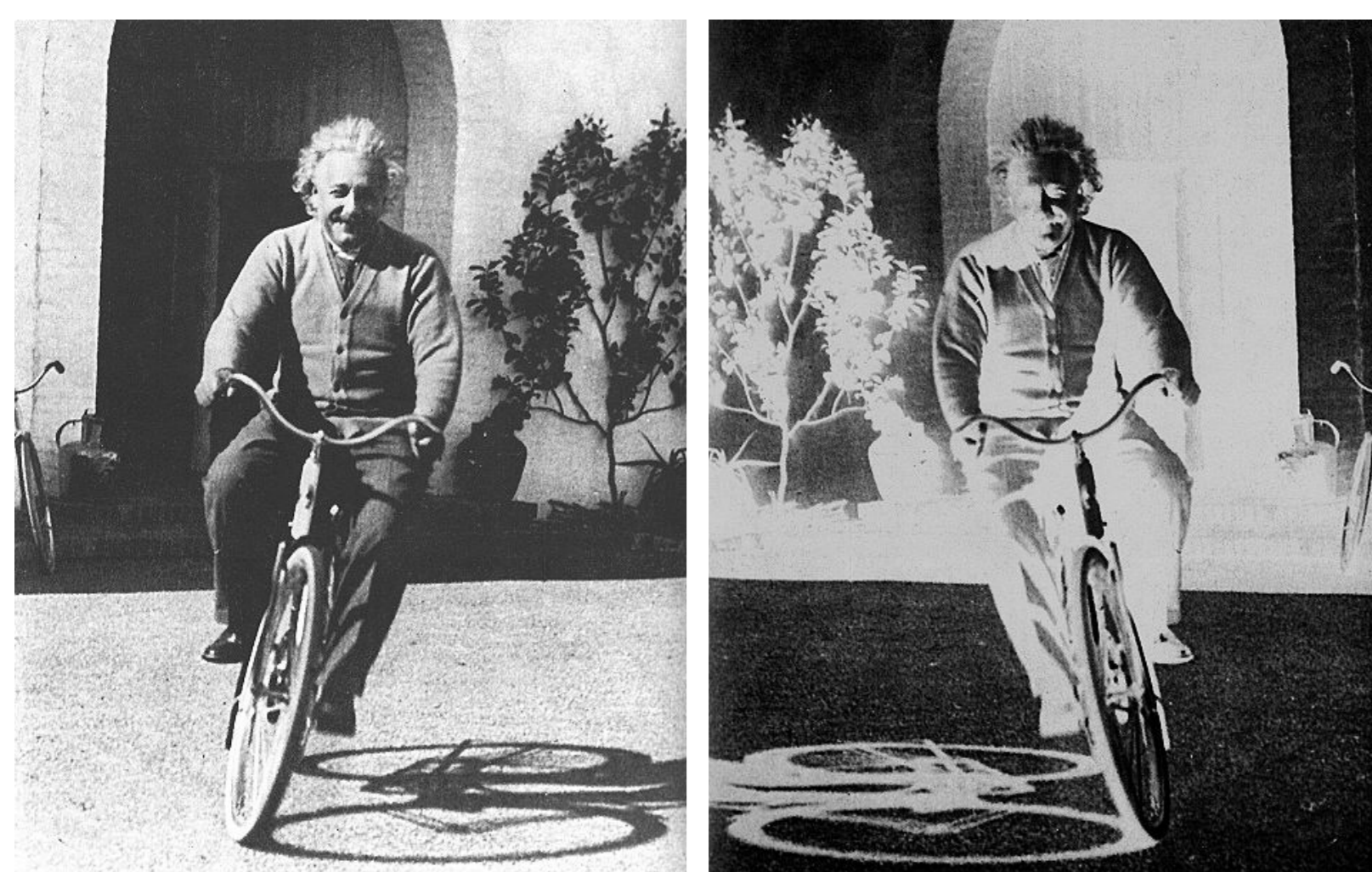


Figure 1: 「対称」?

反物質研究の大きな目標の一つが CPT 対称性の検証です。C,P,T は、それぞれ Charge conjugate: 荷電共役(電荷符号の入れ替え), Parity transformation: 空間反転(鏡への映写に相当), Time reversal: 時間反転を表わします。CPT 対称性が存在すると言った場合, C,P,T の全てを入れ替えた世界は我々の世界と対称である, 即ち我々の世界と区別がつかない, ということの意味です。実は, C, P, CP, T などについては対称性が破れている系, つまり我々の世界と物理法則がちょっと違う系があることが知られています。素粒子論の標準模型では局所性やローレンツ変換の不変性などの条件を課すことで CPT 対称性が得られますが, 私達はこれを実験的に検証しようとしています。また, 現代の宇宙論では, 宇宙はビッグバンから始まったと考えられており, 物質と反物質は当量存在するはずですが, 現実の宇宙は物質ばかりに見えます。CPT 対称性に僅かでも破れが見付ければ, このような不思議な現状の理解に寄与できるかもしれません。

| | $ m_m - m_a / m $ | $ q_m + q_a / q $ | $ g_m - g_a / g $ |
|-----------------------------|---|----------------------|----------------------------------|
| $e^- \leftrightarrow e^+$ | $< 8 \times 10^{-9}$ | $< 4 \times 10^{-8}$ | $(-0.5 \pm 2.1) \times 10^{-12}$ |
| $p \leftrightarrow \bar{p}$ | $< 2 \times 10^{-9}$ | $< 2 \times 10^{-9}$ | $(-0.1 \pm 2.1) \times 10^{-3}$ |
| | $\Delta(q/m)/(q/m) = (9 \pm 9 \times 10^{-11})$ | | |
| $n \leftrightarrow \bar{n}$ | $< (9 \pm 5) \times 10^{-5}$ | — | — |

上の表は, 現在までに測定された電子・陽電子, 陽子・反陽子, 中性子・反中性子といった粒子・反粒子ペアの各物理量を比較したものです。10桁以上の高い精度で一致していることがわかっているもの, わずか 3 桁程度しか比較できていないものなどがあります。これらを高精度で測定していくのが第一の目標です。

反陽子原子 $\bar{p}A^+$

原子の構造は, 中心に原子の質量の大半を占める原子核があり, その周りを幾つかの電子がまわっているというものです。この時, 現代の物理学に於いては, 原子内の電子は連続的な好き勝手な状態は取れず, 或る決まった離散的なエネルギーの状態(エネルギー準位)しか取ることができないことがわかっています。

我々が興味を持っている反陽子原子とは, 電子の代わりに反陽子が原子核にクーロン力で束縛された「奇妙な」原子です。非常に低いエネルギー(イオン化エネルギー程度以下)で反陽子が原子にぶつかれば, 反陽子は電子と入れ替わって原子に捕獲され, 反陽子原子が生成されます。反陽子は原子に捕獲された直後は高いエネルギー準位にありますが, すぐに低い準位へと落ちていき, 最後は原子核に「吸収」されて消滅します。この過程にかかる時間, 言い換えると反陽子原子の寿命は真空中では $1 \mu\text{s}$ 程度以上あると予想され, 人間の感覚からすると決して長くはありませんが, 物理的な性質を調べるには十分長く, 準安定状態にあるとされています。

我々は非常にゆっくりとした反陽子を真空中で原子に衝突させることで準安定な反陽子原子を生成し, その生成過程を明らかにしようとしています。

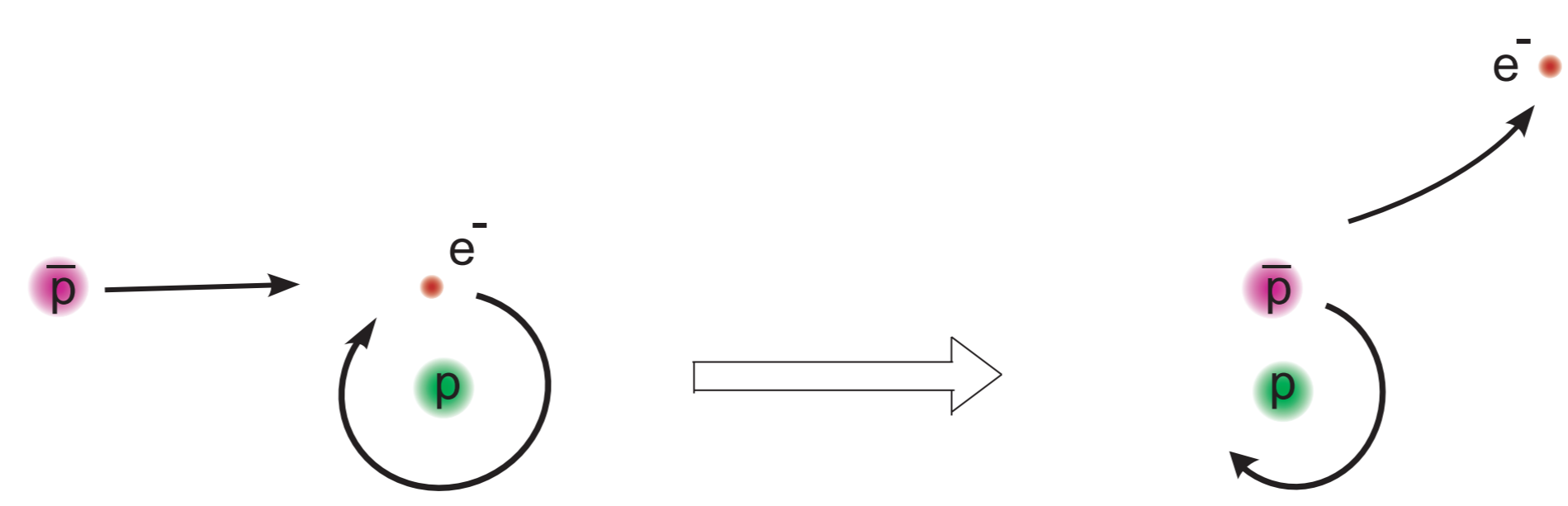


Figure 2: 非常に遅い反陽子を水素原子にぶつくと電子を蹴飛ばした反陽子と水素原子核(陽子)の束縛状態(反陽子水素原子)が出来る

反水素原子 $\bar{\text{H}}$

水素原子(H)は, 最も単純な原子で陽子(p)と電子(e^-)からなります。水素原子は精密分光が盛んに行なわれており, 水素原子自身だけでなく, 構成する陽子, 電子の物理量が非常に高い精度で知られるようになってきました。反水素原子($\bar{\text{H}}$)は, この水素原子の反物質であり, 反陽子(\bar{p})と陽電子(e^+)から成っています。原理的には, 水素原子と同じ分光学的手法を反水素原子に適用することで, それらの間の物理量を高精度で比較出来る為, 対称性の検証が可能と考えられます。

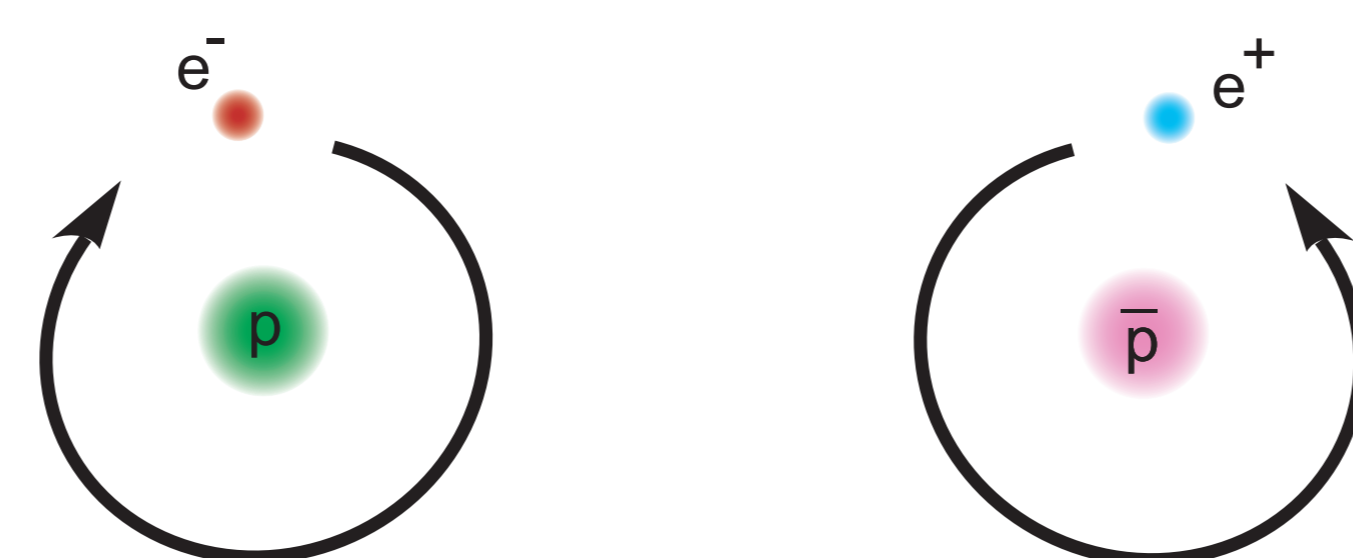


Figure 3: 水素原子(左)と反水素原子(右)

反水素を手に入れるには, まず「材料」である反陽子と陽電子をまず準備しなければなりません。陽電子は, ${}^{22}\text{Na}$ などの β^+ 崩壊する放射性同位元素から得ることができますが, これを効率的に蓄積して利用する装置を開発しています。反陽子は, 1955 年に発見されたときと基本的には同じように加速器を使って陽子を原子核にぶつける方法で生成されていますが, それ故に非常に高いエネルギーを持っています。我々は効率良く反陽子を蓄積, 冷却し, 更には超低速反陽子ビーム源にもなる装置(MUSASHI)を開発しました。

また, 効率良く合成するには反陽子と陽電子を相対速度がほとんど 0 で混ぜ合わせなければなりませんし, 生成した後も精密測定をする為には, それらの原子が「冷えて」いる必要もあります。そのような条件で反水素原子を合成する為に cusp 磁場を用いた装置の開発を進め, 効率的に冷えた反水素原子を合成することに成功しました。今後はマイクロ波分光を行ない, 反水素原子の基底状態の超微細構造を調べていく予定です。

反粒子の検出

粒子と反粒子は出会うと消滅します。陽子 - 反陽子消滅の場合では, 複数個の π 中間子(π^+, π^- や π^0) が, 電子 - 陽電子消滅ではスピンの状態によりますが 2 本の 511 keV の γ 線が放出されます。これら二次粒子の軌跡を観測することで, 反粒子の存在していた位置(消滅した位置)を知ることができます。後に述べる反陽子の冷却や反水素合成時にこのことを用いた位置検出技術が応用されています。

CERN の反陽子減速器 AD

反陽子は, 加速した陽子を Cu や Ir などの金属標的に衝突させ, それらの原子核中の核子との反応で生成します。その為に非常に高いエネルギーを持っており, 光速に近い速さで走っています。この非常に速い反陽子を適度な速さにまで減速にしない限り, 反物質を合成したり, 反陽子と物質の相互作用を研究するのは困難です。

CERN (欧州合同素粒子原子核研究機構, Organisation européenne pour la recherche nucléaire) では, PS (Proton Synchrotron, 陽子シンクロトロン) で 26 GeV/c にまで加速された陽子(p)ビームを Ir 標的に照射し, Ir 原子核を構成する核子との反応によって反陽子を生成しています。この反陽子は, 反陽子減速器(AD, Antiproton Decelerator)で蓄積, 減速, 冷却されて低速反陽子ビームとして供給されています。この時反陽子のエネルギーは 5.3 MeV, 速さに換算すると光速の 10% 程にまで減速されています。このような装置は世界で CERN にしか存在しません。



Figure 4: CERN の加速器群(但し地下...)

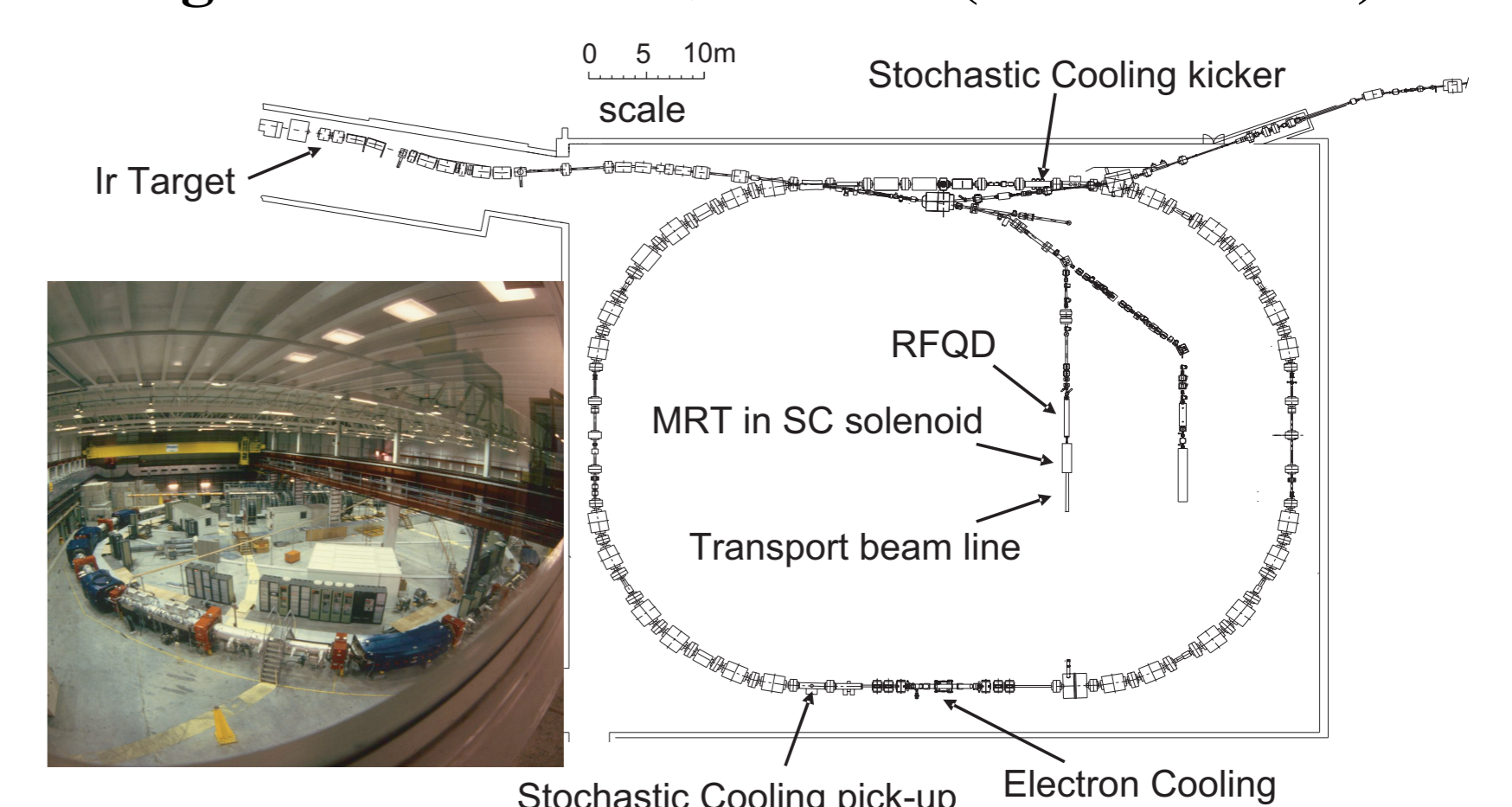


Figure 5: AD hall layout

ASACUSA

ASACUSA (Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons) は, その低速反陽子を用いた原子物理の研究,

- 反陽子原子生成初期過程の研究
- 反陽子による原子, 分子のイオン化過程の研究
- 反陽子ヘリウム原子の分光学的研究
- 反陽子と原子核との消滅過程の研究
- 反水素生成とその分光学的研究

を目的とした国際研究グループであり, 駒場キャンパスの本研究室をはじめとする東京大学や理化学研究所の他, オーストリア, デンマーク, ドイツ, ハンガリー, イタリア, イギリスなどの大学・研究機関が参加しています。

本研究室では, 特に反陽子原子生成過程の研究, 反水素生成と分光による CPT 対称性の検証に焦点を当て, MUSASHI というサブグループを構成しています。この為に, 原子物理の他にも原子核物理, プラズマ物理, 加速器物理, 高エネルギー物理, 放射線物理といった分野の知識, それにデータ処理, 超高真空, 超伝導磁場の技術など幅広い分野を基にして, 研究を進めています。