

J-Park の 長期計画の一端

山口 嘉夫

J-Park が 長い 苦闘の後, 完成, 活動を開始した
事は誠に喜ばしい。

しかしその現状を視るに, 既成の, 準備段階以来
の研究計画に 比較され, その長期的展望を欠いておる
かに見える。

J-Park は, 予想以上に 多額の建設費を要した。
これを 支出してくれた tax-payer の支援と期待に応える
爲にも, J-Park の 永久的 長期有効活用の 途を考へ
なくてはならぬ。それが 関係する我等 community の 責務であり

そこで, 以下の視点を以り, J-Park の 長期利用研究
計画の一, 二をこゝに 提唱したい。それは

Anti-matter Factory

Charm-Factory

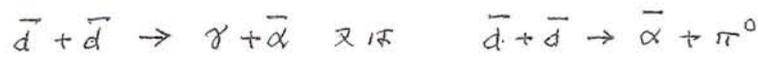
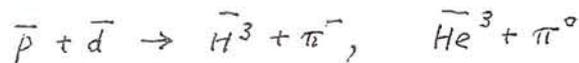
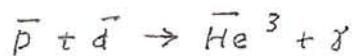
の二つで, それらは 東は 密接に連動した 一連の
collider complex である。以下 この complex について
略述しよう。

要は, CERN や GSI に負けず, 否 それを 遥かに
上廻る, 世界一の研究施設を, Jpark に用意することに
眼目がある。

§1 Antimatter Factory

これについては 2008年の pbar-08, Naha, Okinawa なる Workshop で話した。

そこで用意した abstract と transparencies を示さう。要は、高エネルギーの陽子シンクロトロンを用いても、 \bar{d} やそれより重い antinuclei の生産率が余りにも小さいので、 \bar{p} を多量に蓄積し、collider-storage-ring complex を巧みに配置して



...

等の融合反応で、light antinuclei を次々と合成してゆかうと云ふ計画である。

$\bar{\text{Li}}$, $\bar{\text{B}}$ etc が合成できることを、当面の目標とする。

$\bar{\text{U}}$ 合成まで長い道程があり、J-Park の寿命は十分に長からう。

\bar{d} 合成の collider として、GSI に以前提案されたものを例示した。

Y. Yamaguchi, Antimatter Factory, A Talk at
Workshop on Cold Antimatter Plasma and Application
to Fundamental Physics (pbar-08),
February 20 (Wed) - 22 (Fri), 2008,
Naha, Okinawa, Japan

Antimatter Factory

Yoshio YAMAGUCHI

Theoretical Physics Laboratory, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

It is intended to plan a facility to produce antinuclei and antiatoms as much as heavy (Antimatter Factory).

Antinuclei up to mass number $A = 3$ have been created at CPS, AGS and U-70. Antialpha particles are not yet detected, even though present high energy accelerators/colliders, such as SPS, Tevatron, RICH and LHC, are able to produce, energetically and in principle, much heavier antinuclei, antinucleus production (with anti mass number A) shall be exponentially more difficult with increasing A . This is because hot-spot (fire ball) formed by high energy collisions could produced as many anti-baryons (anti quarks) as compared to baryons (quarks), but emitted hadrons from the surface (hadronization) layers of fire balls shall be dominantly mesons, baryons and their antis, only tiny parts of anti baryons can form \bar{d} , ${}^3\bar{H}$, ${}^3\bar{He}$.

To investigate seriously the difference, if any, among matter (nuclei, atoms, ...) and antimatter, we may wish to have various antinuclei ($A \geq 4$) and antiatoms. High energy accelerators/colliders at presently running are not able to produce ${}^4\bar{He}$ and heavier antis. Then it may be better to try to cook heavy nuclei from accumulated antiprotons. In a way our synthesis looks similar to primordial nucleosynthesis just after the Big Bang and nuclear synthesis at central zones of main sequence stars.

However there exist several differences. We can not store antineutrons \bar{n} . We can not rely on weak and radiative processes, such as $\bar{p} + \bar{p} \rightarrow \bar{d} + e^- + \bar{\nu}_e$, (p, γ) reactions. Production ratio \bar{d}/\bar{p} at high energies is small $\sim 10^{-3}$. Therefore, it seems we must first mass-produce \bar{d} from \bar{p} . Such a production method has already been proposed at GSI, utilizing the reaction $\bar{p} + \bar{p} \rightarrow \bar{N} + \bar{\Delta} \rightarrow \bar{d} + \pi^-$ with the energetically asymmetric $\bar{p} - \bar{p}$ collider. After enough accumulation of \bar{d} , $\bar{p} + \bar{d}$ and $\bar{d} + \bar{d}$ shall produce ${}^3\bar{H}$, ${}^3\bar{He}$. $\bar{d} + {}^3\bar{H}$ and $\bar{d} + {}^3\bar{He}$ will produce ${}^4\bar{He}$. Repeated use of (\bar{d}, \bar{p}) and (\bar{d}, \bar{n}) we may cook heavier nuclei.

To realize these nuclear reactions we need storage rings (and colliding zone) of several 100 MeV/c and relevant bending magnets.

Such facility, consisting of set of asymmetric colliders (a few GeV/c and a few 100 MeV/c) and beam transports, beam cooling parts, if constructed, may be useful to measure cross sections of many nuclear reactions (including radiative capture process) relevant to nucleosynthesis after Big Bang and of astrophysical importance. Such measurement may also serve to the Fusion Projects for energy production.

Furthermore, μ^+ catalyzed fusion may be tried to produce very light antinuclei.

This facility may cost substantially. But there must be many (used part of) colliders and detectors, already shut down, in the world. Economical use of such parts is the way to cost down.

Eventually I wish to see the synthesis of nuclei (atoms) up to the heaviest. Very accurate test of properties of antinuclei (atoms) must uncover something new different from nuclei (atoms), beside the accurate check of *CPT* theorem, etc.

Antimatter Factory

— Midsummer Night's Dream —



— Real Project —

Summer ~ autumn

2007

Yoshio YAMAGUCHI

To synthesize all antinuclei and
antiatoms

1

08 02 02

Antiparticles

100 yrs ago 1908

liquid He
Geiger counter

● Existence of Molecules Perrin

1905 A. Einstein

★ special relativity
photon photo-electric effect }
● Brownian motion

1928 Dirac equation (relativistic electron)

negative energy state

hole theory

hole = positron of charge $+e$

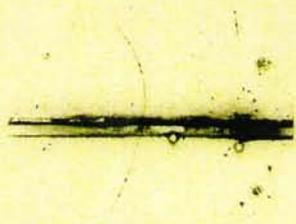
Dirac, Weyl, ...

($m_e \neq m_p$
stability of H atom)

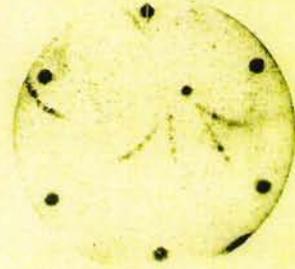
hole = positron

2

- 1928 Quantization of Electro-magnetic Field (Dirac)
 " spin $1/2$ fields (Jordan-Wigner)
- 1929 Quantum Theory of Fields (Heisenberg - Pauli)
- 1932 C.D. Anderson cloud chamber
 with plate
 magnetic field



different
 curvature

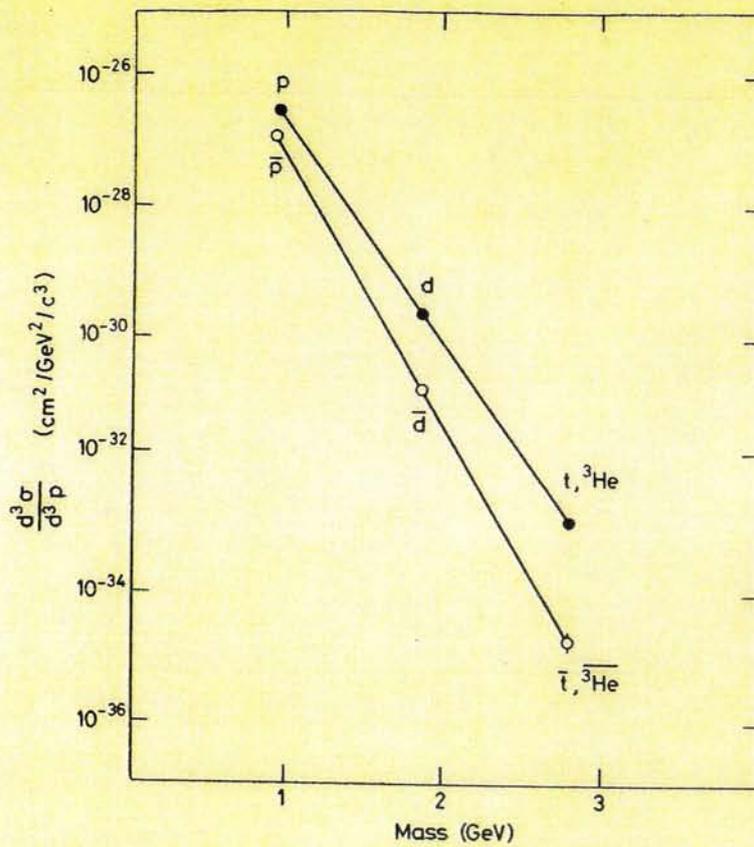


From the wall

many cloud chamber crews saw these pictures

electrons like to make back scatterings
 ($\sim 180^\circ$ scattering)

- 1937 Anderson - Neddelmayer μ
 μ^+ μ^- (at that time
 Yukawa's
 nuclear force carrier)
- 1947 Powell et al π^+ π^- $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu$
 π^+ π^-



particle \leftrightarrow antiparticle

particle = antiparticle

γ, π^0

Antinucleons

\bar{p} Segre - Chamberlain 1955

\bar{n} 1957

$A = -2$
 \bar{d} 1965

$A = -3$
 $\bar{^3\text{He}}$ 1970

$\bar{^3\text{H}}$ 1974

$A = -4$

not yet 5

Let us synthesize

antinuclei

$$- A \geq 4$$

∴ high energy accelerators/colliders

→ very small no. of antinuclei

6

Discovery

USA	cosmic rays	e^+	1932
USA	RL Bevatron	\bar{p}	1955
	6.2 GeV p	\bar{n}	1957
USA	BNL AGS 30 GeV p	\bar{d}	1965
CH	CERN PS 25 GeV p	\bar{d}	1965
CCCP	IHEP U-70 68 GeV p	\bar{t}	1974
		$\overline{^3\text{He}}$	1970
		$\overline{^4\text{He}}$	not yet

7

anti-nuclei

\bar{p}	Oct. 1955 NPP 1995	E. Segre* and C. Wiegand and T. Ypsilantis	O. Chamberlain* PR 100 (55) 947	Berkeley (RL) · } Bevatron 6.2 GeV p
\bar{n}	1957	B. Cork, O. Piccione, and G. Lambertson	W. Wenzel PR 15	
\bar{d}	1965	L. M. Lederman, ... A. Zichichi, ...	PRL 14 (65) 1003 N.C. 39 (65) 10	(BNL-AGS) (CERN-PS)
$\bar{^3H}$	1974	N. K. Vishnevsky, ...	Yad. Fiz. 20 (74) 694	(IHEP U-70)
$\bar{^3He}$	1970	Y. M. Antipov, ...	Yad. Fiz. 12 (70) 311	(IHEP U-70)
$\bar{^4He}$				

Bevatron 6.2 GeV (energy) p
1954 -

Nobel Prize

\bar{p} Oct 1955 PR 100 (55) 947 (L)

E. Segre & Chamberlain 1959

particle - antiparticle

symmetry

CPT theorem

asymmetry

CP and T violation

special relativistic
local quantum field theories }
}

→ CPT theorem

(weak) gravity →

symmetric

matter - antimatter

10

? E asymmetry between matter and antimatter ?

beside CP and T



CPT under
strong gravity ?

?
?

experimental test of particle - antiparticle diff.
matter - antimatter

11



tests at all levels

particles, atoms, ..., matters

We need antimuclei
antiatoms

⋮



antinucleus factory

12

scenario of

origin and evolution of our universe

symmetry breaking of a (symmetric) theory
is essential

GUT \rightarrow broken SM
SSSM

At Present

We live in the symmetry broken world

We are seeing symmetry broken laws
as our laws of nature

13

Special & general relativity \rightarrow
 \times inertial system
 (absolute rest system)
 In our Universe \exists CBR
 \downarrow
 local rest frame
 (local inertial system)

14

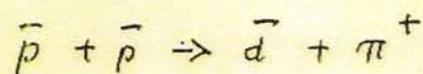
\bar{n} \times collection and storage \times

To produce Antinuclei

1st step many \bar{d}

GSI letter of intent

...., Yamazaki, ...



15

\bar{n}

weak processes

radiative processes

} not useful

cf.

nucleosynthesis in early universe

nuclear reactions

in stellar interior

associated with

SN explosion

16

\bar{p} , \bar{d} , ...

Storage ring and/or bottle

\bar{n}

storage bottle

(very low energy)

\bar{p}

CERN

antiproton facilities

n

storage bottle (sextupole sphere)

(Paul et al)

$$E_n \approx 1.8 \times 10^{-7} \text{ eV } (B_0 = 3 \text{ T})$$

sextuple torus

$$E_{\text{max}} = \underbrace{\mu_n}_{\text{magneton}} B_0 \left(\frac{R}{r_0} + 1 \right)$$

$$(6 \times 10^{-8} \text{ eV/T}) (B_0 \text{ in T})$$

\bar{m}

?

17

(\bar{d}, \bar{p}) (\bar{d}, \bar{n})

(\bar{t}, \bar{p}) $(\bar{t}, \bar{n}), \dots$

$(\bar{^3\text{He}}, \bar{p})$ $(\bar{^3\text{He}}, \bar{n}), \dots$

asymmetric collider

$\sim \text{GeV}/c$

to collect all products

$\rightarrow -A = 4, 5, 6$

19

Free fall experiment

e^-

n

not yet

e^+

\bar{p}

\bar{n}

\vdots

20

natural H

$${}^2\text{H}/\text{H} = 0.015\%$$

high energy $p + \text{metal} \rightarrow \bar{p} + X, \bar{d} + X$

$$\bar{d}/\bar{p} \approx 10^{-3}$$

$$\bar{p} + \bar{p} \rightarrow \bar{d} + \pi^{-}$$

GSI, Letter of Intent, 2004

Antideuteron Breeding in a Double Ring Collider

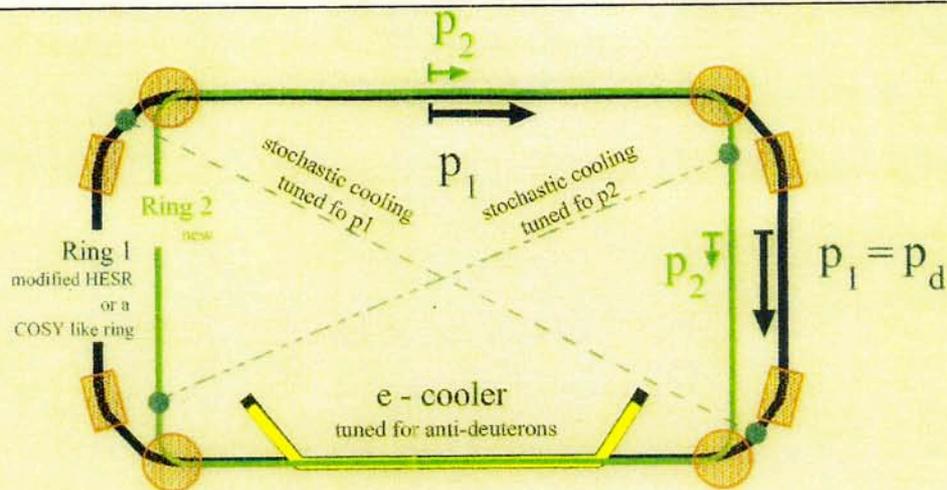
Letter of Intent for the Facility for Antiproton and Ion Research, FAIR

M. Abd El Bary, S. Abd El Samad, A. Gillitzer, D. Grzonka, F. Iazzi, K. Kilian, H. Koch,
C. Kozhuharov, R. Maier, D. Möhl, W. Oelert, W. Quint, T. Sefzick, M. Wada, P. Winter,
J. Walz, Y. Yamazaki

for the FLAIR users group

21

April 16, 2004



reaction:



Figure 1: Schematic setup for the two rings: Ring 1 (blue) like COSY or HESR in a modified version with special dipoles at every end of the straight sections for bending particles with momentum p_1 and p_2 into ring 1 and ring 2 (green), respectively. The two straight sections are collision regions. The separated arcs allow for independent stochastic cooling.

The dipoles indicated by circular symbols bend particles with momentum p_2 by 90° and particles with momentum p_1 by only 30° , the bend of the remaining 60° is done by the dipoles indicated by squares.

22

References

- [1] H. Koch: "Production of antideuterons and heavier antinuclei," *Hyperfine Interact.* **44** (1988) 59-64
- [2] G. Gabrielse, A. Khabbaz, D. S. Hall, C. Heimann, H. Kalinowsky, and W. Jhe: "Precision mass spectroscopy of the antiproton and proton using simultaneously trapped particles," *Phys. Rev. Lett.* **82** (1999) 3198-3201
- [3] W. Quint and G. Gabrielse: "The magnetic moment of the antiproton," *Hyperfine Interact.* **76** (1993) 379-380
W. Quint, J. Alonso, S. Djekić, H.-J. Kluge, S. Stahl, T. Valenzuela, J. Verdú, M. Vogel, and G. Werth: "Continuous Stern-Gerlach effect and the magnetic moment of the antiproton," *Nucl. Instr. Meth. B* **214**, 207 (2004)
- [4] T. E. O. Ericson and P. Osland: "Polarization break-up of antideuterons in the nuclear Coulomb field," *Nucl. Phys. A* **249** (1975) 445-456
- [5] G. Baur: "The break-up of antideuterons in the Coulomb field of nuclei," *Phys. Lett. B* **60** (1976) 137-140

上で antimatter factory として light antinuclei の合成を論じた。

しかし antimatter factory の目指す処は、何も素粒子・原子核物理に限定される譯ではない。e⁺ の強力源を併設し中性粒子の trap (storage ring/bottle) を備へれば、広く原子・分子・イオン物理学の研究な土のとならう (勿論、反原子、反分子、反イオンである)。更に、長期的には、中視的 (mesoscopic) な反微粒子 (anti-fine particles) を造り出し、巨視的反物質物性研究への第一歩を踏み出せることも出来よう。

\bar{p} の storage facility (acceleration/deceleration を備へた) を、何も CERN に monopolize させることはない。抑も、いかなる研究も一研究機関で独占的に遂行して可むといふものではないらう。如何なる科学的成果といふども、独立な再検証があつてこそ、科学的知識は確立され、蓄積されてゆくべきものであらう。

然るに故に、J-Park に antiproton の、広範な研究分野の要望に耐へる、包括的な facility を建設したいと主張する所以である。

この facility が (部分的にもせよ) 出来、様々な beam handling technique に習熟し、beams の acrobatic control が可能となれば、High energy の

$\mu^+\mu^-$ collider (circular)

や e^+e^- linear collider

の R&D に資する処甚大であらう。

顧みるに、少し前、CERN の \bar{p} facility が近く終焉を迎へると仄聞し、その全施設を貰ひ受け、J-Park に移転せしむらうと考へた。所が最近、international space lab が 2020 年迄延命した様に、CERN はもうしばらく \bar{p} facility を作り続け

よせると云ふ。

たのらこそ、 \bar{p} の、 \bar{n} の、 \bar{l} のより大型で、(素粒子・原子核研究のみならず) 包括的・学際的研究を可能にし、且長期的使用に耐える、facility を J-Park に新設する事は、益々その意義と重要性が増したと勘考可也。

§2 Charm Factory

J-Park の爲の長期研究計画の第二のものは、 c -quark を含む baryons と mesons の大量生産可能な施設とそれを利用した素粒子、原子核物理の研究である。

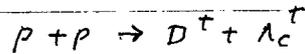
高エネルギー (数 10 GeV) の陽子線を静止標的に照射した時、 D や Λ_c などが出来てもこれらの γ 因子は ~ 10 で、相対論的な寿命の伸びと u, d の利点があるため、 π や K 等 Strangeness 0, ± 1 のハドロンが背景が多すぎて、 D や Λ_c 等 charm に拘る実験はしにくいらう。

D - Λ_c threshold の少し上で強力な p beam の collider を作れば、lab. system で遅い D や Λ_c 等を作れて、charm hadrons の low energy の実験をし易いのではないかと狙っている。それができれば "charm nuclei" の研究に E 役立つであらう。尤も \bar{c} を含む "double hypernuclei" の研究より可なりむづかしいからであらう。

charm factory の スケッチ

D^+ (1869), D^0 (1864), Λ_c^+ (2285), Σ_c (2452) を考慮し

D-A



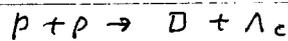
の threshold の少し上の p-p collider をつくす。

強力な p beam が必要

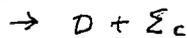
衝突点の近くでは, p-beam の径を $\lesssim 10 \mu\text{m}$ 以下

にしぼる。

○ π の多重発生を伴う events を捨てる, low multiplicity events のみを記録する様にして



や



を多く含む事象をとらへ, 所期の charm experiments を行ふ, この一次の現象から

D-N 散乱

Λ_c -N, Σ_c -N 散乱

や charm nuclei 作りとそれに関する研究を行ふ。

○ それに当っては, マイクロ乃至ナノスケールの実験装置を準備しなければならず, それに成功すれば, 世界初演の実験遂行として名を馳せることが出来る。言ふ迄もなく, radiation damage に強い中核的装置が必要である。

軽イオンや重イオン (勿論 nucleus) をこの collider に注入できれば, GSI に対抗する有力な研究も出来るよう。

mesoscopic cluster 或は 微粒子

原子数の小さい (linear direction に原子が
数ヶ所を数10ヶ, 時にはそれ以上並んでおるやうな)

もの (微粒子, fine particles) ((もう少し広義に,

mesoscopic matter 或は cluster と可なり)) では,

表面の effects が効き, macroscopic body (matter)

とは 異なる性質 (物性) や 形状 を 発現 する。

数個可いし 数10 (数100) の 原子 から なる
(有色) 金属 の 興味 あり 結晶 構造 (magic number
がある, 等々) ・ 形状 等 が その 一例 である, ちっと

大きな (原子数の多い) ものでも, 雪の結晶のように,

驚くべき多様な形態があるのを引用してもよからう。

anti atoms の 量産 が 出来れば microscopic な
分子 造り から, mesoscopic fine particles へと 研究 を
進められよう。

これまで、世界初 - との curiosity の面ばかり強調して来た。しかし物理学にとって最も重要なのは

particles と antiparticles (hadrons, leptons, nuclei, atoms, molecules or ions, ...)

との間で、それらの誘性質 或は相互作用に於て、

CP 非保存, T 非保存 或は CPT 非保存
以外にどのような差異があるのかを 明示することには在る。

その学際利用, 応用, エスワミンの PR, 専内容
ならざる一般の人々の関心を惹き立てば, 巨費を要する
big science の facility の建設は, 望むべくもなからう。