

高能所激光-康普顿背散射伽玛光源 (IHEP-LCS) 技术条件与展望

IHEP-LCS (高能物理研究所-激光康普顿源)

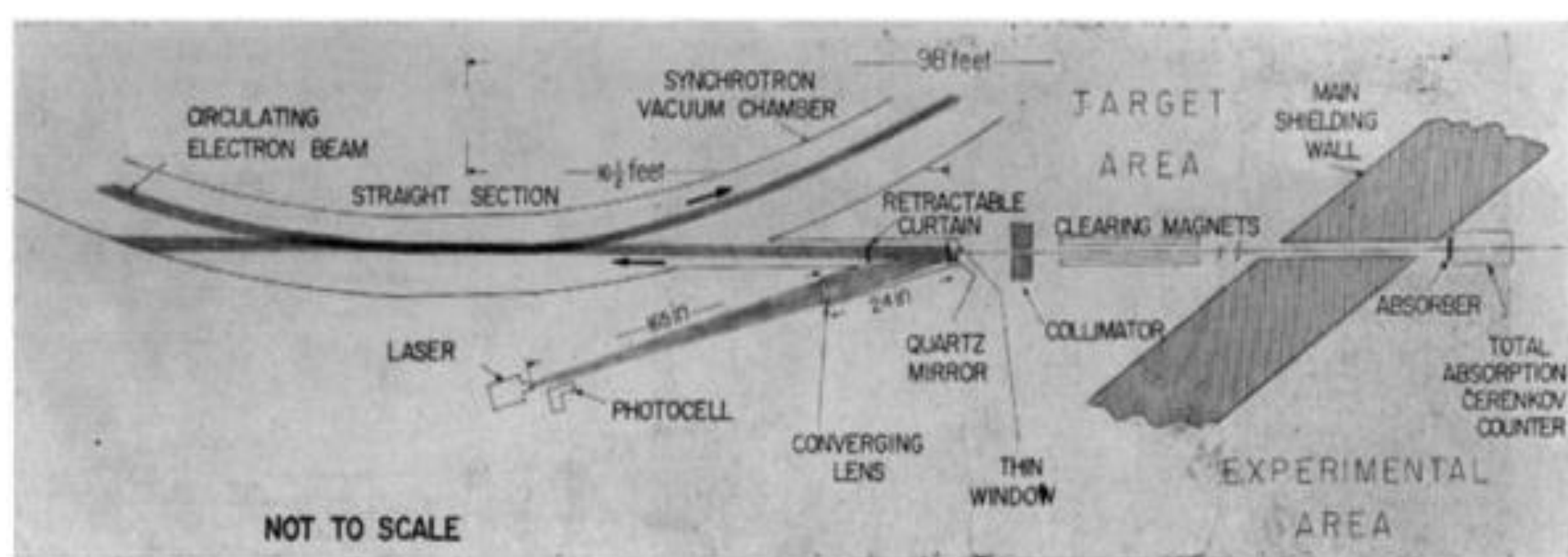
胡 涛/李家才
中国科学院高能所

目 录

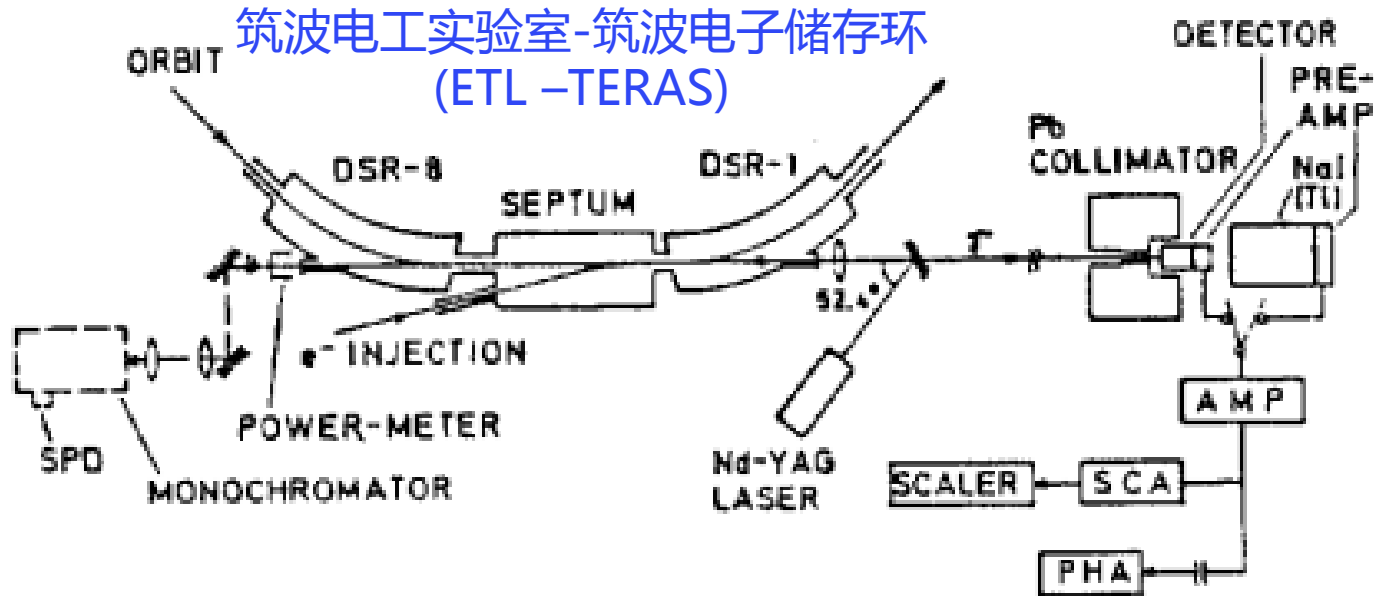
- 一，早期康普顿背散射光源性能验证
- 二，激光驱动的康普顿光源装置\性能介绍
- 三，康普顿光源应用
- 四，背散射伽玛光源技术条件与试验束LCS方案介绍
- 五，高能所加速器运行现状
- 六， BEPCII-强伽玛光源展望
- 小结

一, 早期康普顿背散射光源性能验证

- 上世纪60年代初, 相干光子束与自由电子的康普顿散射 (或逆康散射) 的物理机制获得了理论研究上的确认和实验证明, 利用这个作用机制在电子加速器上产生了高能X-射线或 γ 射线。
- 60-70年的10年中, 具有代表性的康普顿背散射试验是在麻省6GeV的Cambridge Electron Accelerator (CEA)完成的。所用的是红宝石激光器($\lambda=694.3\text{nm}$)0.2J同2mA的电子束碰撞, 看到每脉冲8个光子, 光子能量几百MeV, 并且保留了激光束的高度极化99% @ 0.8 GeV CARLO BRIKPORAD, PHYSICAL REVIEW VOLUME 138, NUMBER 68 21 JUN E 1965.



- 1983年美国Brookhaven实验室的LEGS项目：HIGH ENERGY GAMMA RAY BEAMS FROM COMPTONBACKSCATTERED LASER LIGHT*。
- 1985日本在ETL-TERAS上也完成了LCS的试验（也是世界上第三个成功的试验,第二个是意大利Frascatide LADON光子束），电子储存环能量600MeV(100mA)，采用Nd-YAG激光器1.2瓦，利用康普顿背散射产生6.5MeV准单色伽玛束，绝对测量使用了Φ8×8英寸的NaI闪烁计数器，最高产额~ $6\times 10^4/s$ 。



IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-32, No. 5, October 1985

二，激光驱动康普顿光源装置性能介绍

- 以上3个康普顿背散射光子束都还是原理性实验装置，伽玛束应用也还是试验性的，但这几个实验都说明了，激光束与相对论电子束对撞，产生康普顿背散射伽玛束有以下特点：

- 1，激光康普顿背散射伽玛束是高度极化的；
- 2，准单能（ $1/\gamma$ 散角内集中了准单一能量的最大光子数）；
- 3，光子能量可调谐（加速器电子束能量可变）。

- 到了90年代，国际上利用康普顿背散射产生的准单色极化的伽马射线源，可说是遍地开花，最具有代表性的背散射伽马光源是美国杜克大学-HIGS,1996年开始运行，

(1) 装置介绍

美国杜克大学-HIGS(High Intensity Gamma-ray Source)成功使用了FEL与相对论电子束的对撞,并开展了伽玛-核物理等应用实验(1996), 2009年升级改造是HIGS的里程碑



HIGS, Duke University, US



Facility/Project: HIGS

Institution: TUNL and Duke University

Country: US

Energy (MeV): 1 – 100

Accelerator: Storage Ring, 0.24 – 1.2 GeV

Laser: FEL, 1060 – 190 nm (1.17 – 6.53 eV)

Total flux: $10^7 - 2 \times 10^{10}$ g/s (max ~10 MeV)

Status: **Operational/User Program**

Research: Nuclear physics, Astrophysics,
National Security

Accelerator Facility

180 MeV Linac pre-injector

180 MeV – 1.15 GeV Booster injector

240 MeV – 1.15 GeV Storage ring

FELs: OK-4 (lin), OK-5 (circ)

HIGS: two-bunch, 40 – 110 mA (typ)



(图片来自杜克大学吴2012)

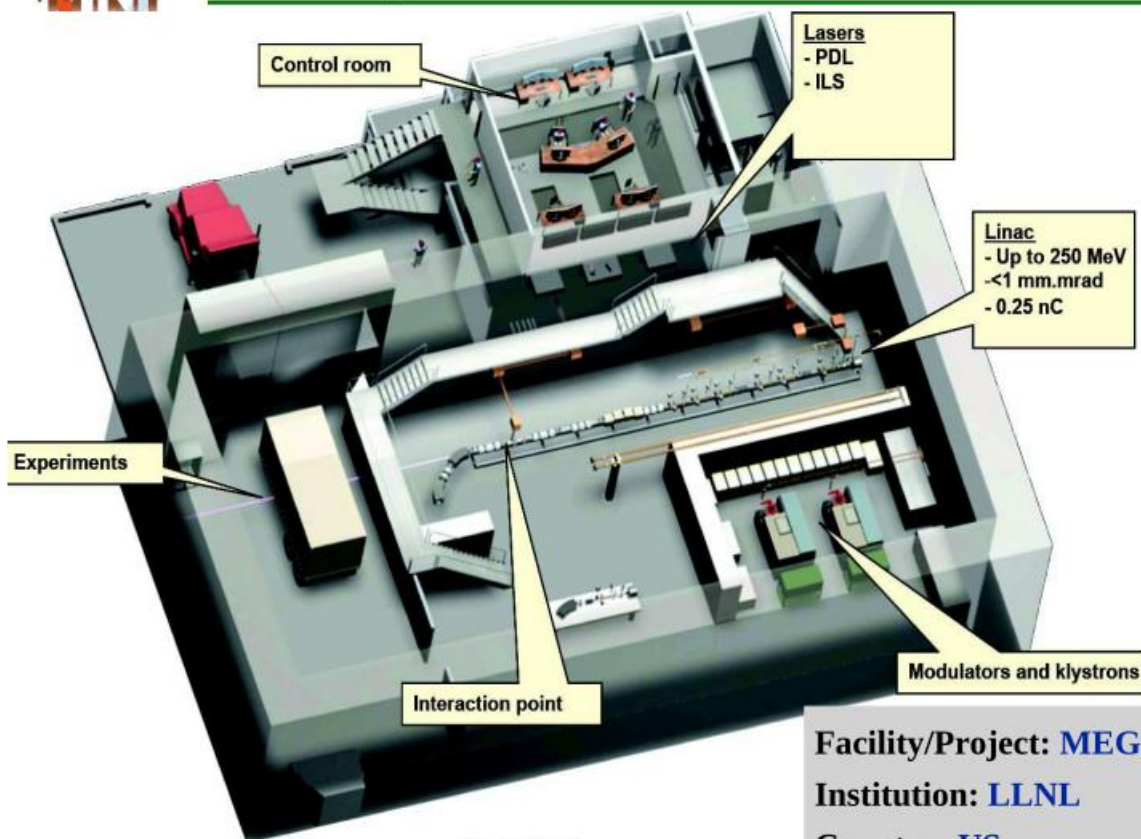
与伽玛核物理研讨会 北京

USA 弗莫尔实验室-单能伽马源 (图片: 杜克大学吴2012)

New Compton Gamma-ray Sources



MEGa-ray, LLNL, US



Félicie Albert FLS-2012

Sources:

1. "The White Book of ELI Nuclear Physics Bucharest-Magurele, Romania," the ELI-Nuclear Physics working group,
2. F. Albert *et al.* "Design Considerations for a Tunable, Laser-based, Compact Mono-energetic Gamma-ray source," FLS2012, Jlab, Mar. 2012.

Facility/Project: **MEGa-ray**

Institution: **LLNL**

Country: **US**

Energy (MeV): **0.5 – 2.3**

Accelerator: **x-band Linac, 250 MeV, 250 pC, 70MV/m, 120 Hz, high replate: 12,000 (100 micro-bunches)**

Laser: **Ring-down cavity (12 kHz)**

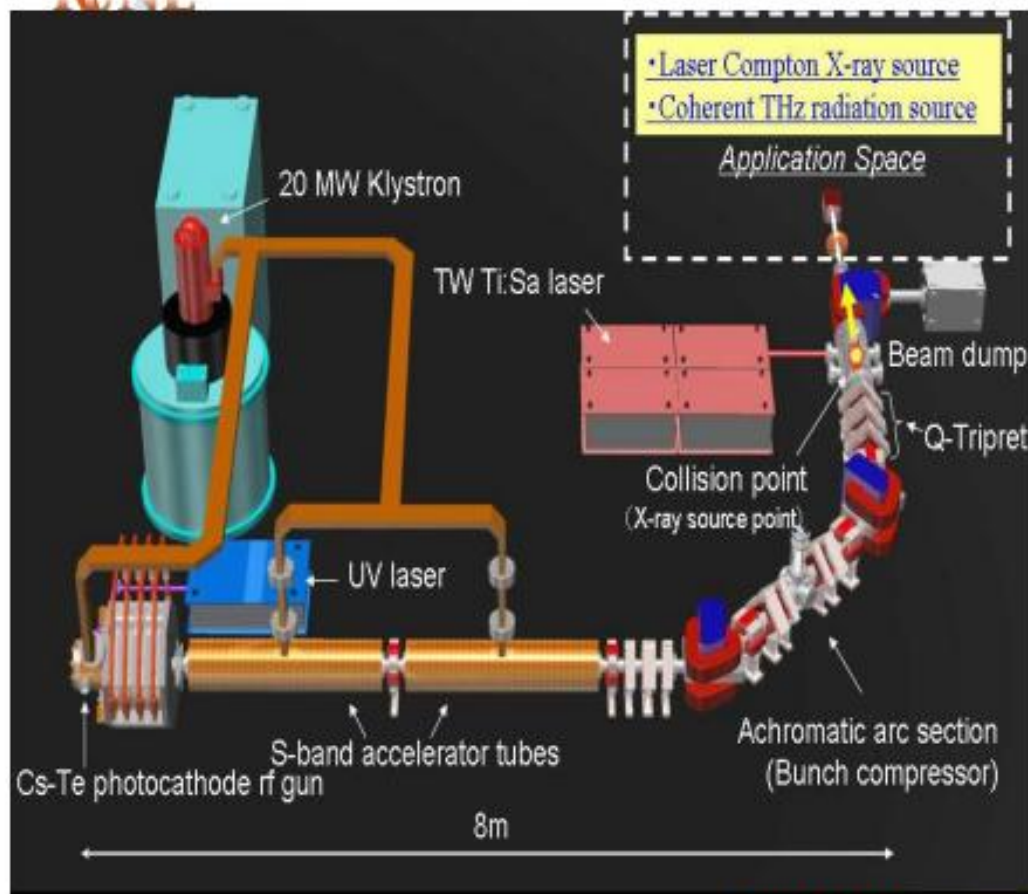
Total flux: **8×10^7 (ph/pulse), 10^{12} ph/s (design)**

Status: **Under Development**

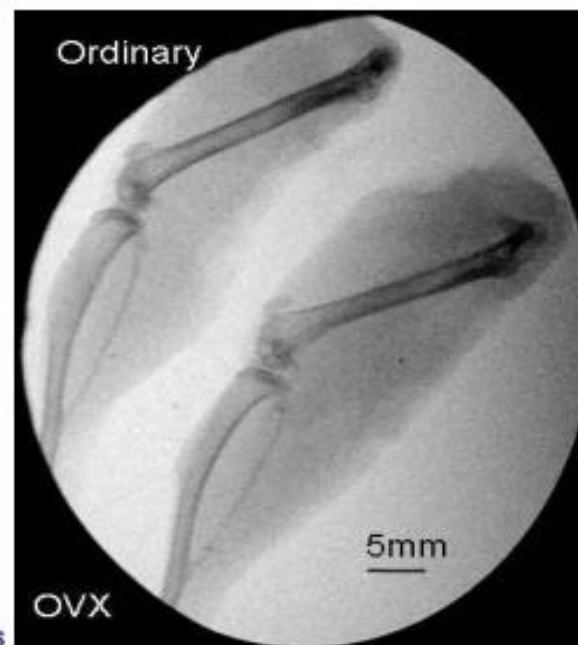
日本-产业技术研究院 (图片: 杜克大学 吴2012)



AIST, Japan



Facility/Project: (hard x-ray project)
Institution: AIST
Country: Japan
Energy (key): 10 – 40
Accelerator: Linac, 40 MeV
Laser: Ti:Sapphire (800 nm)
Flux: 5×10^6 ph/pulse (10 Hz)
 (5×10^9 ph/s, est with multiple collisions)
Status: **Operational** + Development
Applications: Medical and industrial imaging



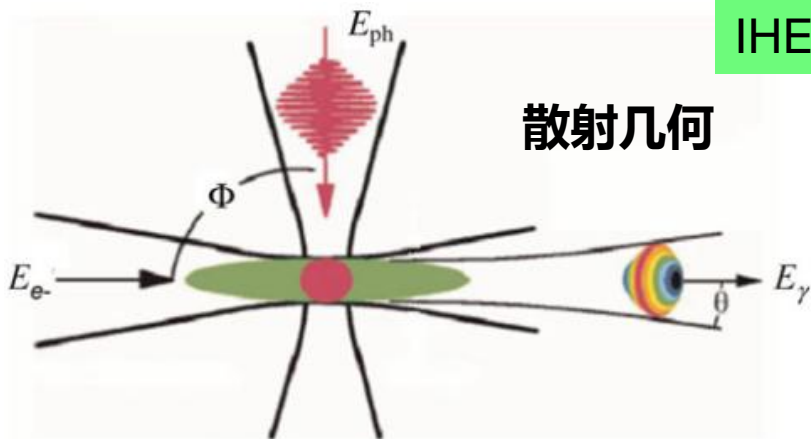
Sources:
 R. Kuroda *et al.* THP038, PAC'11, New York, 2011

avity length: 7.56 m for 4 seed pulses

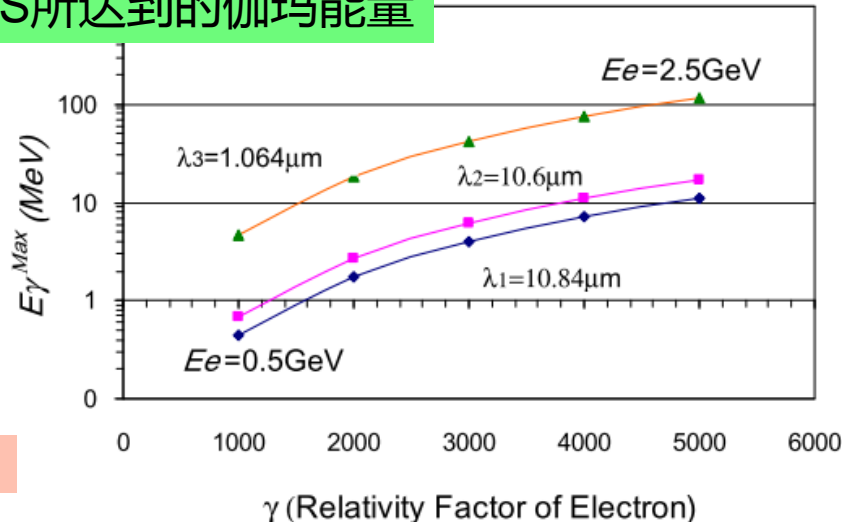
国内康普顿背散射主要实验装置和方案设计

单位/ 装置/年份	LINAC能量 (MeV)	入射激光波长/脉冲能量(J) / 脉冲宽度(ns)	光子产额(ph/s)	背散射最大光子 能量(散射角 θ)
清华/汤姆逊散射初步实验装置 TTX to XGLS /2009 清华 /2013 - 2018	16 ($\gamma = 31.3$) 45($\gamma = 88.1$)	Nd:YAG(钕铝石榴石), 1064nm / 1.5 / 6ns Ti-Sapphire(钛蓝宝石)800nm / 0.5 / 30fs	2.1×10^4 -- 1.0×10^6 $4.7 \times 10^7 - 10^8$	4.6KeV(180 $^\circ$) 51.7KeV 3MeV
上海/ SLEGS(I-II)/2010 上海(III)/2010---	108-112 ($\gamma=211$) 3.5GeV (储存环直线节)	Nd:YAG,1064nm/ 0.113-0.9/21 Nd:YAG,1064nm/10GW(激光腔增益10-100)/10ps	$5.2 \times 10^2 - 1.7 \times 10^3$ 1.9×10^9 -- 2.4×10^{11}	29-32KeV 1.6-204MeV 1-22MeV (环动力学孔径制)
西安 XGLS (唐传祥) /2014-2018	160-400	780nm / 5J / 0.1-10ps	1×10^7	0.5-3 MeV
绵阳/2001	30	Nd:YAG,1.064 μ m/光腔功率 GW	2.5×10^{11} (10^8 /pules; f=2539Hz;辐射强度4W)	0.9-1.8KeV (0.07-0.14nm)
北大/ERL /2011	27	1064nm/3.69 μ J/10ps/	4×10^8	13KeV
合肥/科大-FEL 康普顿背散射 源/2000	800MeV储存环 直线节	FIR-FEL为入射激光, $\lambda =$ 100-420微米, 峰值功率10KW	$0.3 - 1.26 \times 10^4$ /pulse $B = 1.9 - 8 \times 10^{11}$ / (s mm 2 mrad 2 0.1%BW)	30-100KeV
高能所/BEPC-IP2康普顿伽玛 源/2000 高能所/试验束线康普顿伽马源 /(2015概念设计)	BEPC-环/ 1.1-2.8GeV BII-LINAC/ $E = 1.1$ GeV	1.06(10.6) μ m/1J/ 重复频率1KHz Nd:YAG-1064nm/2J/10ns/ $\omega_L = 0.75$ mm	$2.7 - 17.3 \times 10^{20}$ $2.2 - 13.8 \times 10^{19}$ $\sim 10^6$ /pulse	20-140MeV(专用) 2-13MeV(兼用) 21MeV (180 $^\circ$)

(2) LCS几个重要的参数



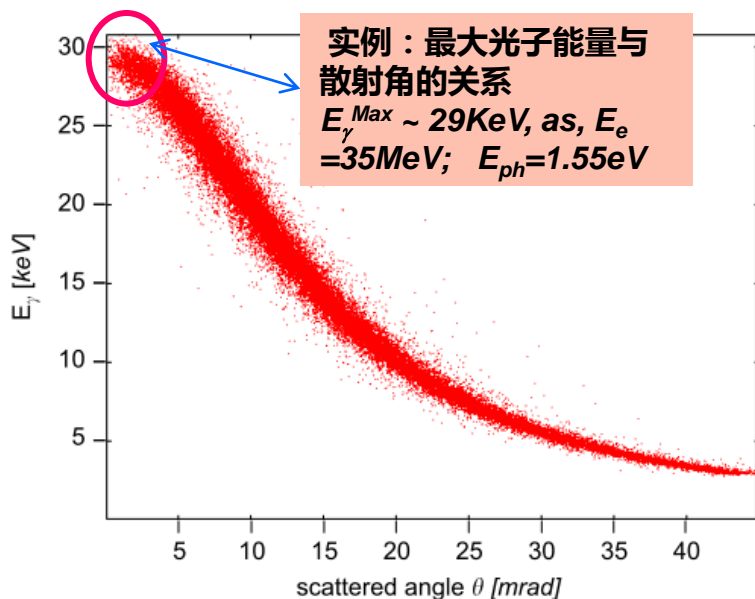
IHEP-LCS所达到的伽玛能量



光子能量

$$E_\gamma = \frac{2\gamma^2(1 - \beta \cos \Phi)}{1 + (a_0^2/2) + \gamma^2 \theta^2} E_{ph}$$

$$E_{\Phi=180^\circ \theta=0} \sim 4\gamma^2 E_{ph}$$



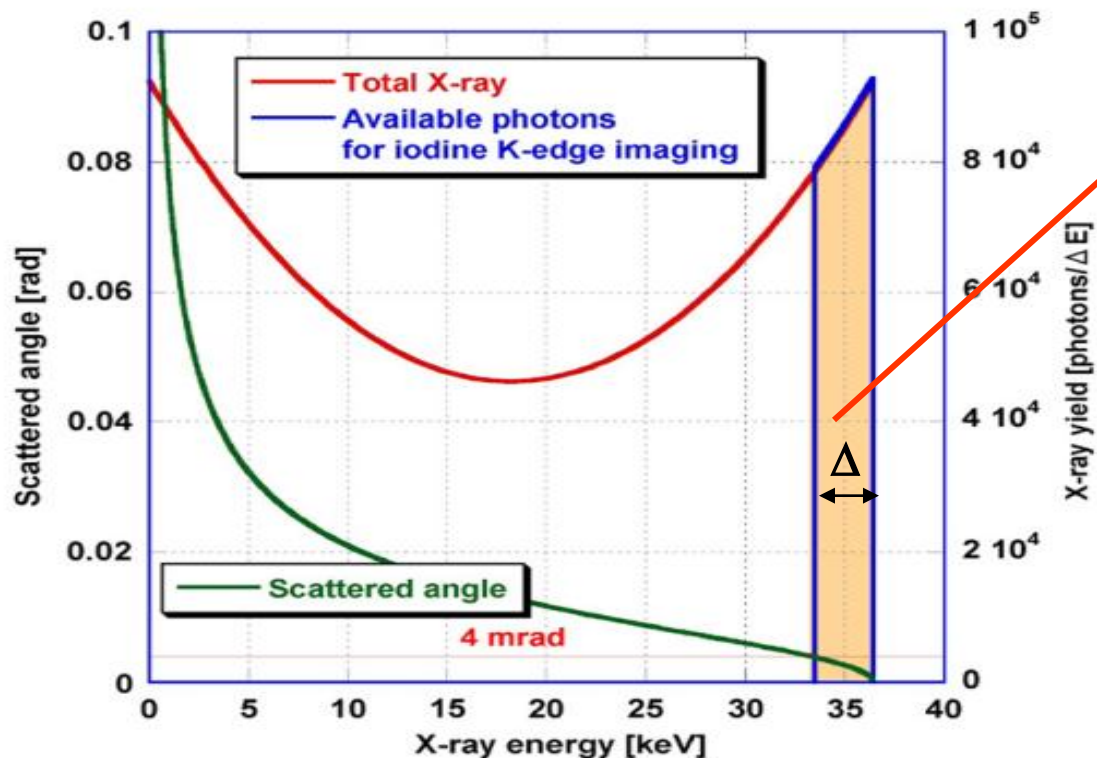
激光康普顿背散射在对头碰几何中**光子产额**：

$$N_{\gamma,pulse} = \frac{N_e N_L \sigma_T}{2\pi (\sigma_e^2 + \sigma_L^2)}$$

光产额计算通常忽略散射过程中量子反冲效应，而采用汤姆孙散射截面。上式表明光产额正比于参与作用的电子和光子数，反比与束流截面。

激光康普顿源潜在应用方面的一个重要品质是**光谱亮度B**，它定义为光子通量的相空间密度

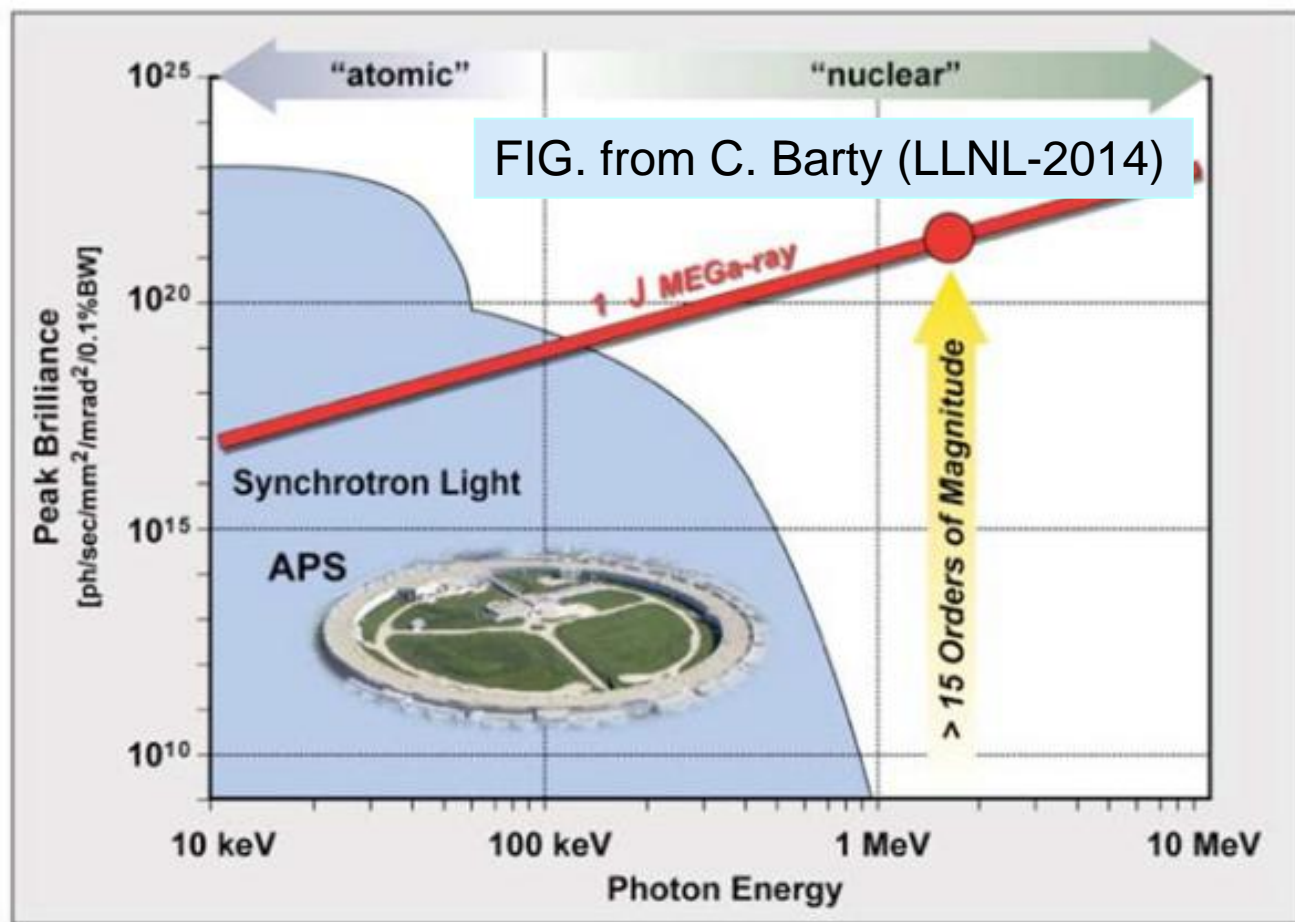
$$B = \frac{N_\gamma}{(2\pi)^{5/2} \delta_x \delta_y \theta_{\gamma_x} \theta_{\gamma_y} \tau_e} / (\text{mrad}^2 \text{ mm}^2 0.1\% \text{ bandwidth s}),$$



$$\Delta E_\gamma / E_\gamma$$

图片来自 R. Kuroda,

三、康普顿光源应用



如图，在100KeV以上的原子核激发能区，3代同步辐射的亮度成指数下降。在2MeV以上康普顿伽玛射线的最佳匹配亮度**超过最大的同步辐射装置亮度15个量级以上**，这对于众多的核应用是一个重要的信息，尤其关系到核材料管理和探测。由于它的准单色性和高亮度也最具有现实的应用意义。在伽玛天体物理和核放射性探测器的刻度等基础工作显示了开创性意义。

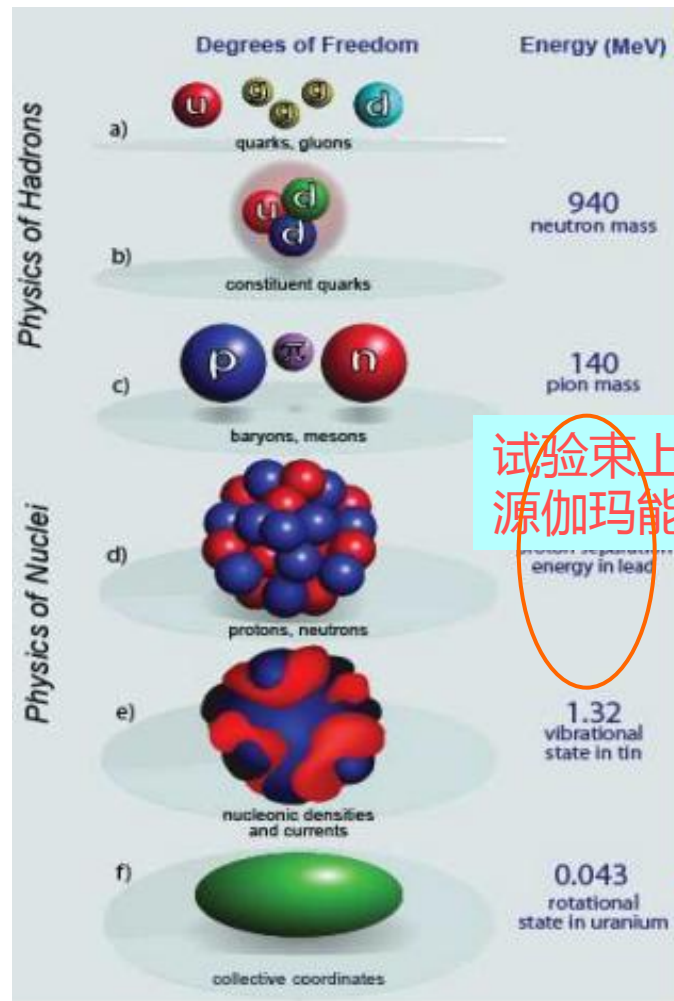
随着电子束能量和束流质量提高，康普顿源的亮度迅速增加。这是因为在**高能电子束团内克服了电子之间的静电排斥力，使之能让束团聚焦到更小的光斑尺寸。**

2014年Los Alamos国家实验室发表文章指出，先前在OMEGA试验上给出了有用的伽玛射线照相信息，但光子能量低得多。现在使用HIGS(杜克大学) $10^8/s$ 的伽玛射线和它的能区，得以继续伽玛照相系统的试验（HIGS提供几MeV到100MeV可调的伽玛束能量）。

康普顿伽玛射线源的一些应用领域：

- **核物理**（核结构、少体核物理，核成像，核天体物理）
- **国家安全**（特殊核材料探测）
- **能源工业**（核废料管理和处理）
- **医学应用**（同位素生产，肿瘤诊断）
- **材料研究**
- **伽玛探测器刻度**
- **加速器物理**（正电子源，束流参数诊断）

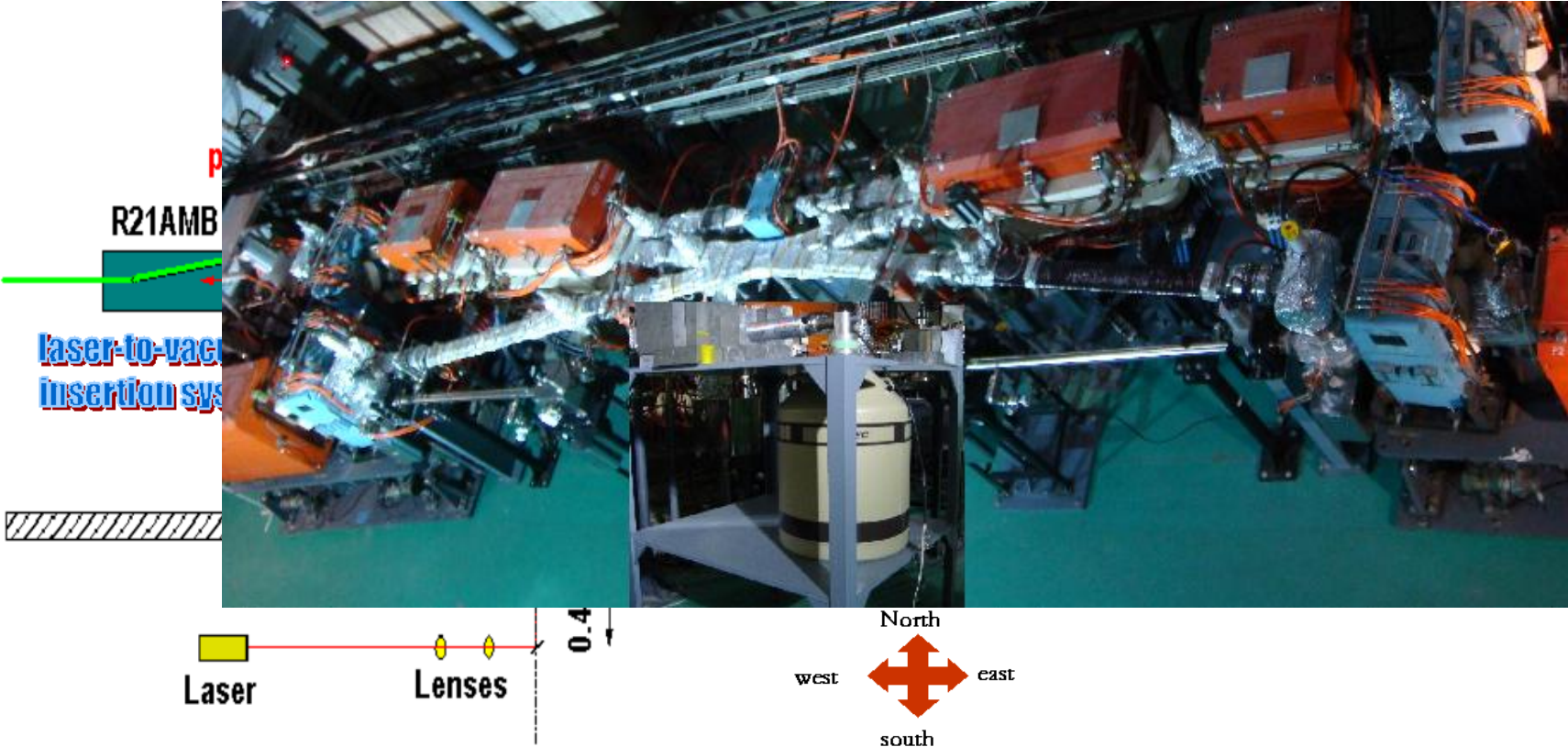
H. R. Weller et al., "Research Opportunities at the Upgraded HIGS Facility," Prog. Part. Nucl. Phys. Vol 62, Issue 1, p. 257-303 (2009).



试验束上康普顿源伽玛能区

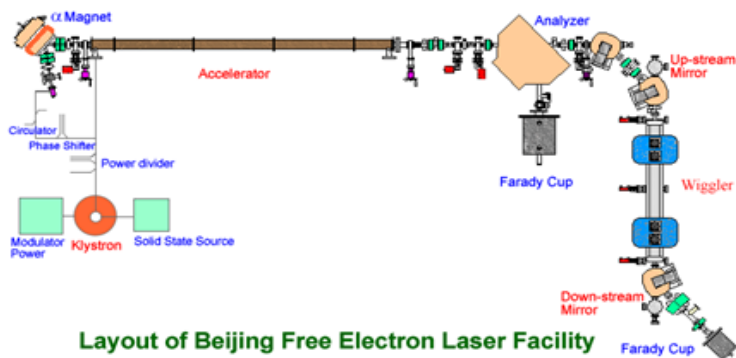
四，高能所拟建背散射伽玛光源的技术条件与试验束线LCS方案介绍

(1) BEPCII第二对撞点运行的康普顿背散射能量测量装置 (2009-2010) ，我们积累了准直、屏蔽与伽马射线测量技术。

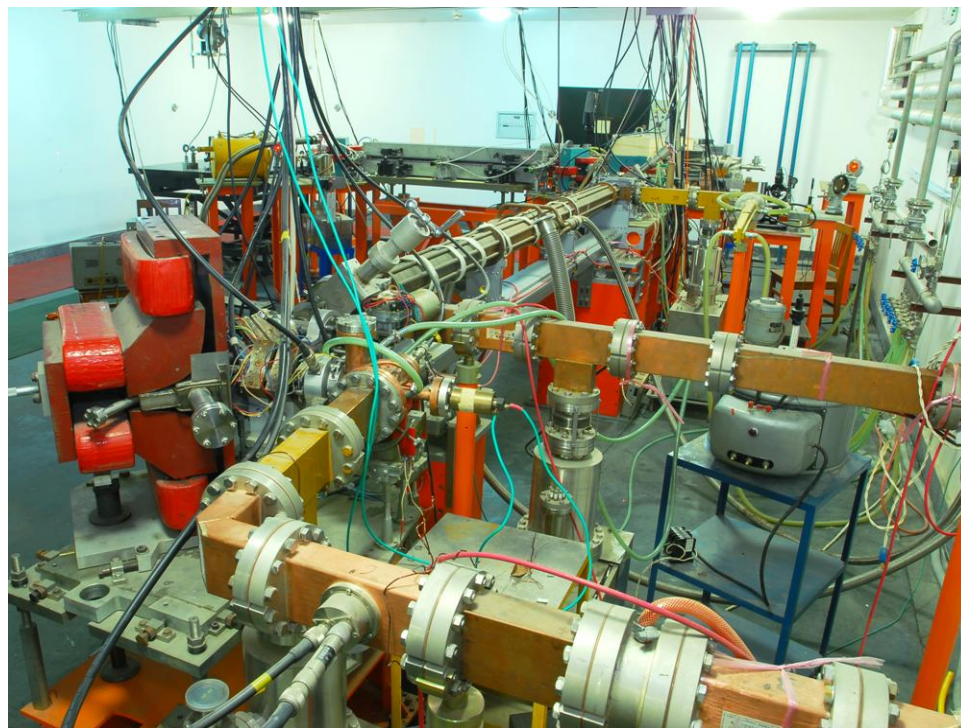


(2) 高能所北京自由电子激光，是在国家863项目的支持下建造起来的新型光源，1993年在亚洲首次实现受激辐射振荡，次年达到饱和出光。光腔技术可在拟建的试验束LCS上得到应用。

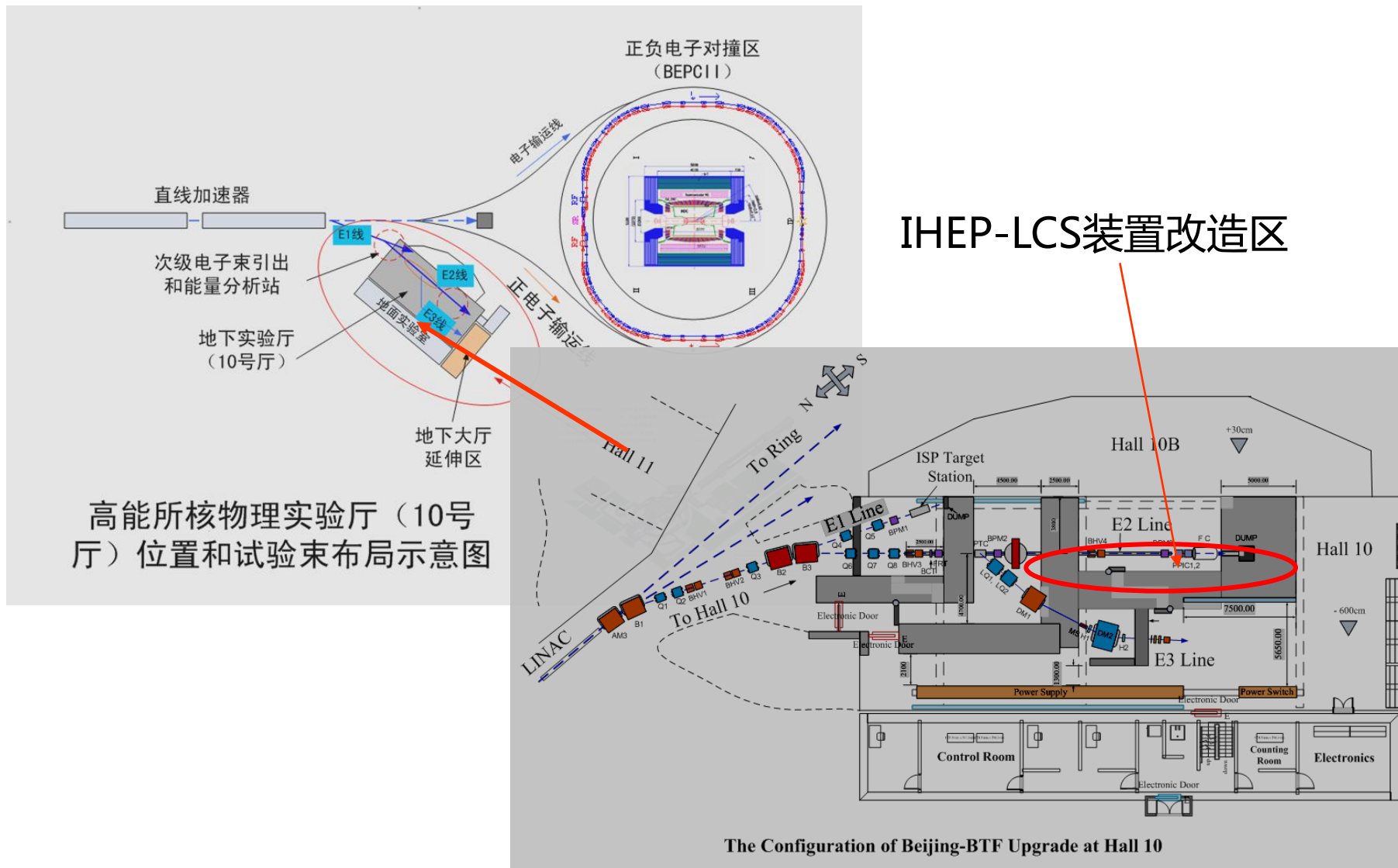
装置布局



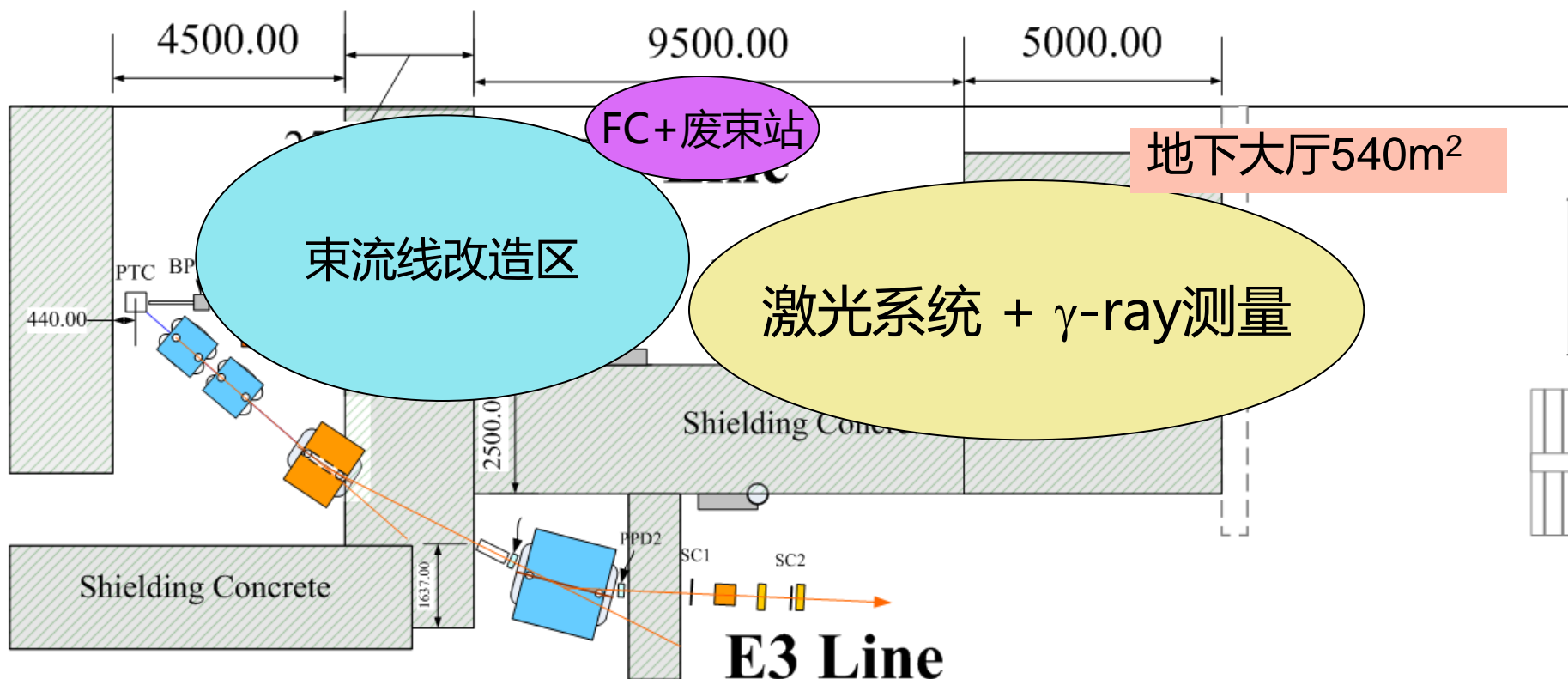
Layout of Beijing Free Electron Laser Facility



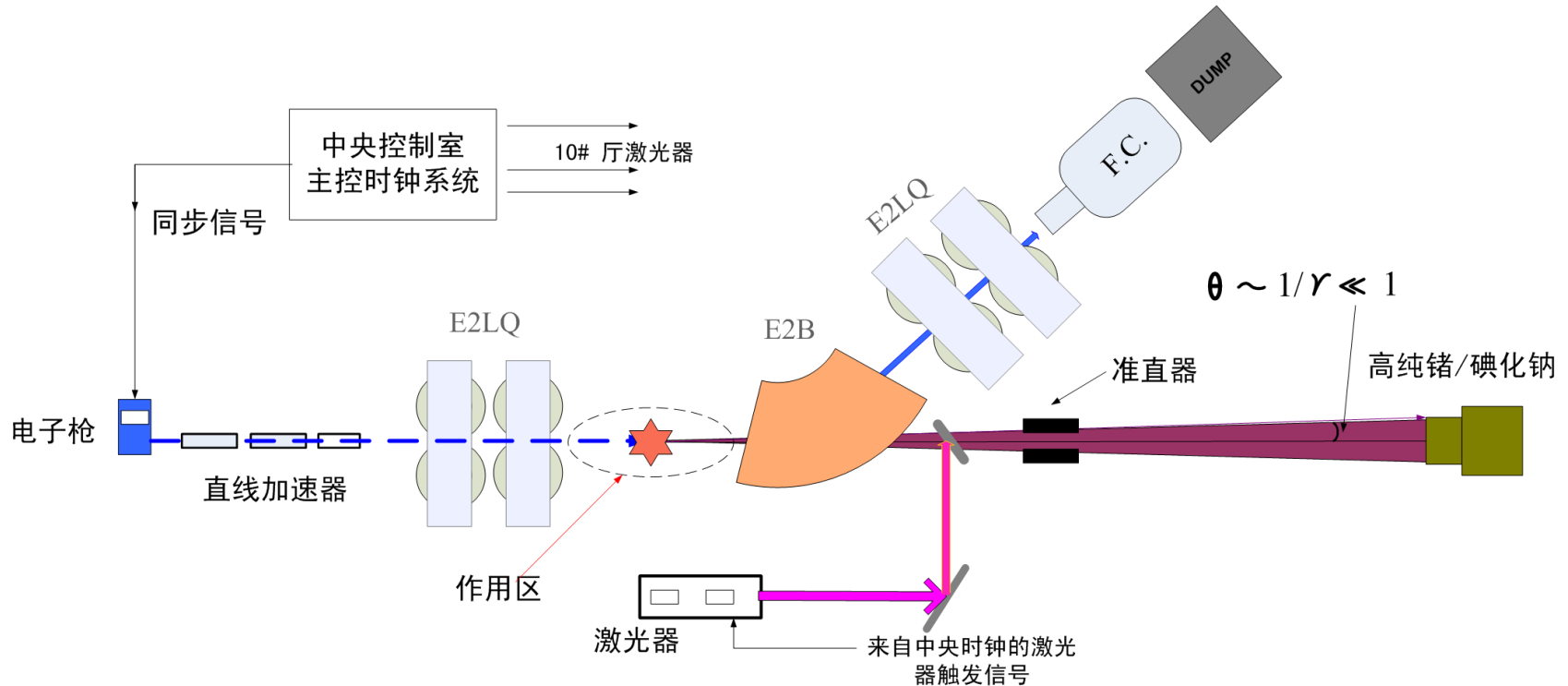
(3) 高能所试验束装置基础 (北京-试验束装置)



(4) 高能所试验束上 LCS试验线设想



• LCS线概念设计 (2015)



• 试验束上LCS线主要相关参数

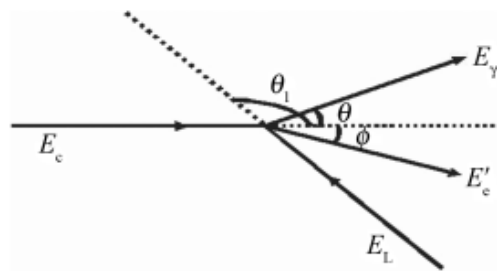
E2 电子束参数		Nd:YAG 激光器参数	
能量/重复频率	最高 2.5GeV/12.5Hz	波长	1064nm
束流脉冲宽度	10ps	脉冲宽度	~10ns
脉冲电量	2nC (10^{10})	脉冲能	~2J
对撞区束团尺寸	$\sigma_{x,y} = 0.5\text{mm}$	重复频率	12.5Hz
束流发射度	$\epsilon_{x,y} = 0.1\text{mm}\cdot\text{mrad}$	对撞点鞍部尺寸	$\omega_0 = 0.75\text{mm}$ (聚焦后)
康普顿背散射 γ -射线参数			
光子能量		光子产额 N_γ/pulse	
8-110MeV@ 0.8-2.5GeV 电子		$N_\gamma^{tot} \sim 1 \times 10^6$	

• 数量级的估计 2015 :

(针对现有试验束和拟配的激光参数)

电子束	参数
能量	1.1 GeV
束流脉冲宽度	10 pS, 2 nS, ...
脉冲电量	2 nC ($10^{10}e$)
束团尺寸 _{10#}	r_b (1.7 mm) 0.5 mm
束流归一化发射度	370 mm mrad

Nd:YAG激光器	参数
波长	1064 nm
脉冲宽度	10 nS
脉冲能	2 J
重复频率	12.5 Hz
对撞点腰尺寸	0.75 mm



左图散射几何，对头碰且散射角取零，忽略反冲效应，汤姆孙散射理论给出能量：

$$E_{\gamma}^{\max} \sim 4\gamma^2 E_i$$

$$E_{\gamma}^{\max} \Big|_{E_e=1.1\text{GeV}; E_i=1.16\text{eV}} \sim 21\text{MeV}$$

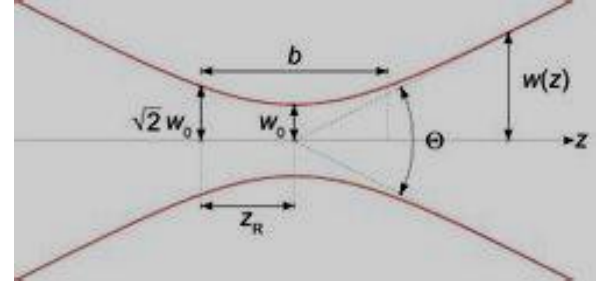
单次散射光子数 (*) :

$$N_{tot} = \sigma_T N_L N_e / 2\pi (\sigma_L^2 + \sigma_e^2)$$

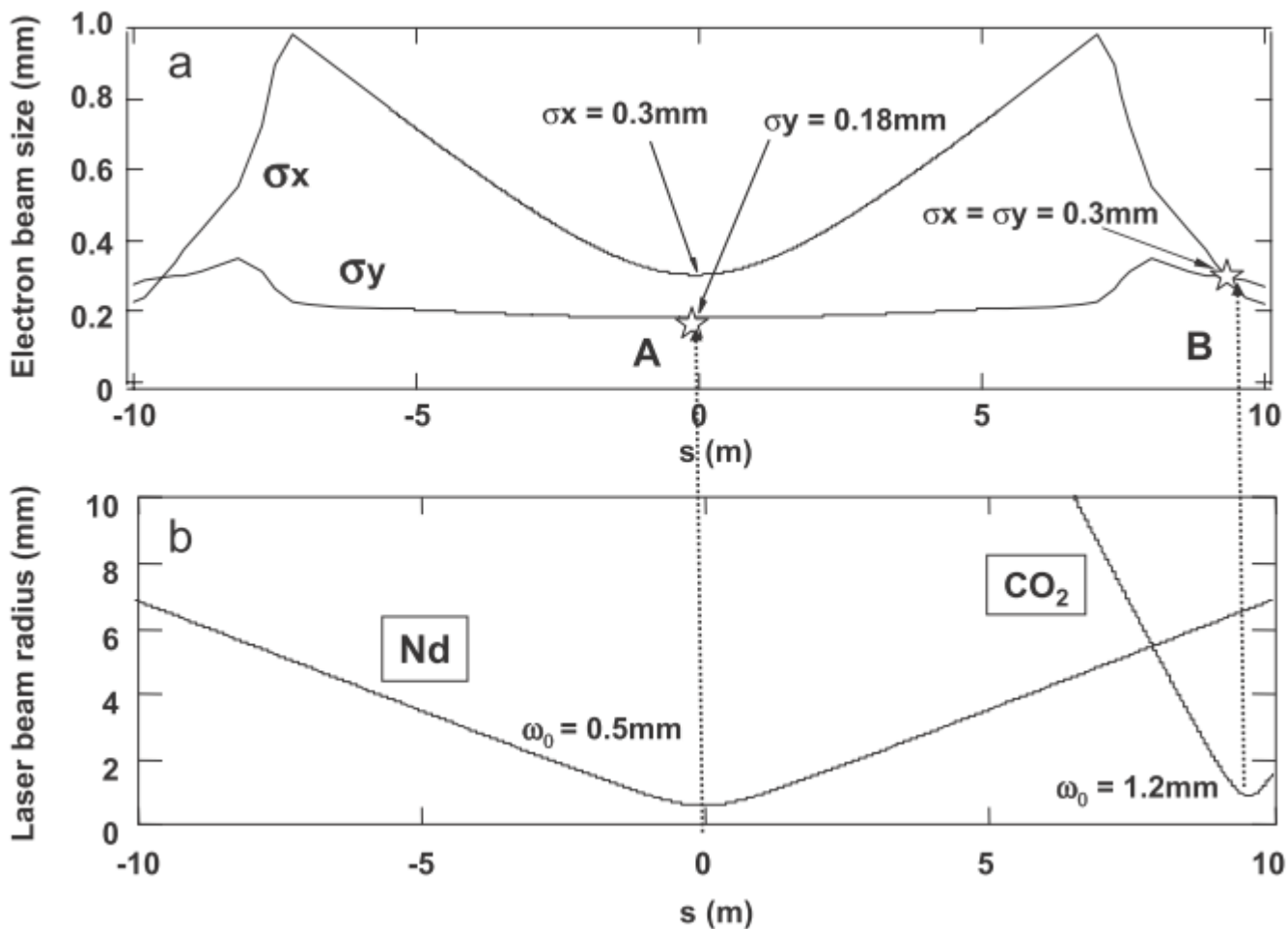
$$\sim 10^6$$

(*) 参考 S. G. Anderson, et al., LLNL-TR-417672

• 现有条件的参数优化



作用几何 at NewSUBARU
-日本兵库大学和关西光子科学所



关于0.1mm束流与加速器的讨论

你好，

我查了一下以前做的结果，如果情况比较理想的话，E2线在最后在一些位置的束流截面是小于1mm的，如果要做到0.1mm，就需要磁铁强度更强一些，并且靶点距离四极磁铁也要更近，如果直线束流情况比较好的话，应该可以在E2线上实现0.1mm左右的束流截面。如果能提供更具体的要求和布局，我可以给出一个具体方案来。

因为束流色散会有比较明显的影响，再其它的线上实现起来比较困难。

刘渭滨

From: lijc

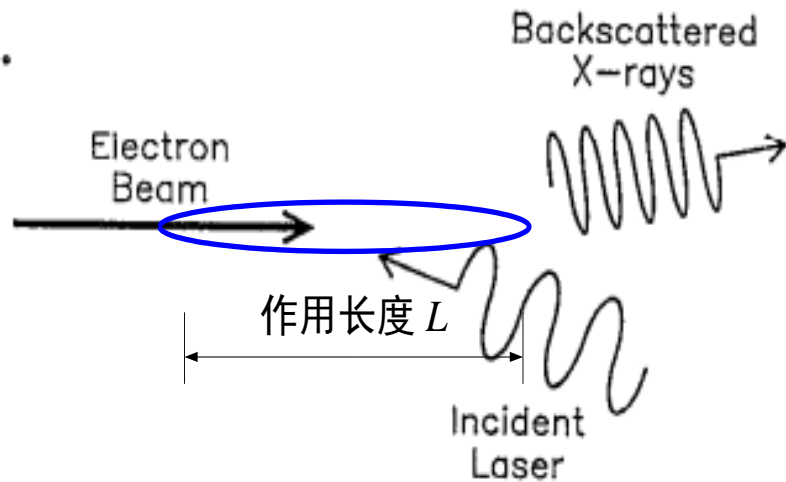
Sent: Friday, January 09, 2015 11:33 AM

To: liuwb@ihep.ac.cn

Subject: 关于 BEPCII 直线加速器末端

相互作用长度基本优化：

参考：J.Appl. Phys. 72,5032 (1992), P.Sprangle, A.Ting, E.Esarey,



为了获得高的背散射产额，一般我们可以假设束流脉冲中所有的电子作用在入射激光场的幅值附近。这个要求是电子束脉冲长度 L_b 小于激光的瑞利长度，即 $L_b < Z_r$ ，为了保持沿着激光脉冲有一个均匀的强度，激光脉冲长度应该是近似等于瑞利长度，即 $L_0 \approx Z_r$ ，另外，

对于高效率工作， $r_0 \geq r_b$ 分别是入射激光的斑束半径和电子束的束斑半径。针对0.1mm的电子束半径 r_b 和现成电子束宽度10ps，设激光束的腰 ω 为0.14mm，则激光的瑞利长度 $Z_r = \pi \omega^2 / \lambda = 5.8\text{cm}$ ，激光脉冲的宽度约为193ps(5.8cm)，这样的考虑，满足以上优化设计。

根据以上优化参数，对撞区有效作用长度 $L = 2Z_r \approx 12\text{cm}$

最大背散射光子功率（ f 填充因子）：

$$P_{tot} \propto f (L / Z_r) \lambda_0^{-1} \times I_b E_b^2 P_0$$

$$f = \begin{cases} A_0 / A_b, & A_0 < A_b \\ 1, & A_0 > A_b \end{cases}$$

A_0, A_b 分别是激光束与电子束的横截面积

• BII-试验线LCS优化的产额和亮度

• 产额 N_γ

$$N_{\gamma,pulse} = \frac{N_e N_L \sigma_T}{2\pi (\sigma_e^2 + \sigma_L^2)},$$



根据以上优化参数 $\sigma_e = 0.1\text{mm}$, $\sigma_L = 0.14\text{mm}$, 并考虑电子束实际到10号厅的输运效率 (0.85×10^{10}) ,

$$N_L = 2\text{J} / 1.865 \times 10^{-19}\text{J} = 1.07 \times 10^{19}$$

$$N_{pulse} \sim 3.2 \times 10^7 \text{phs} ,$$

这个产额是先前的32倍。

• 亮度 B

它表征了辐射源的品质 ,

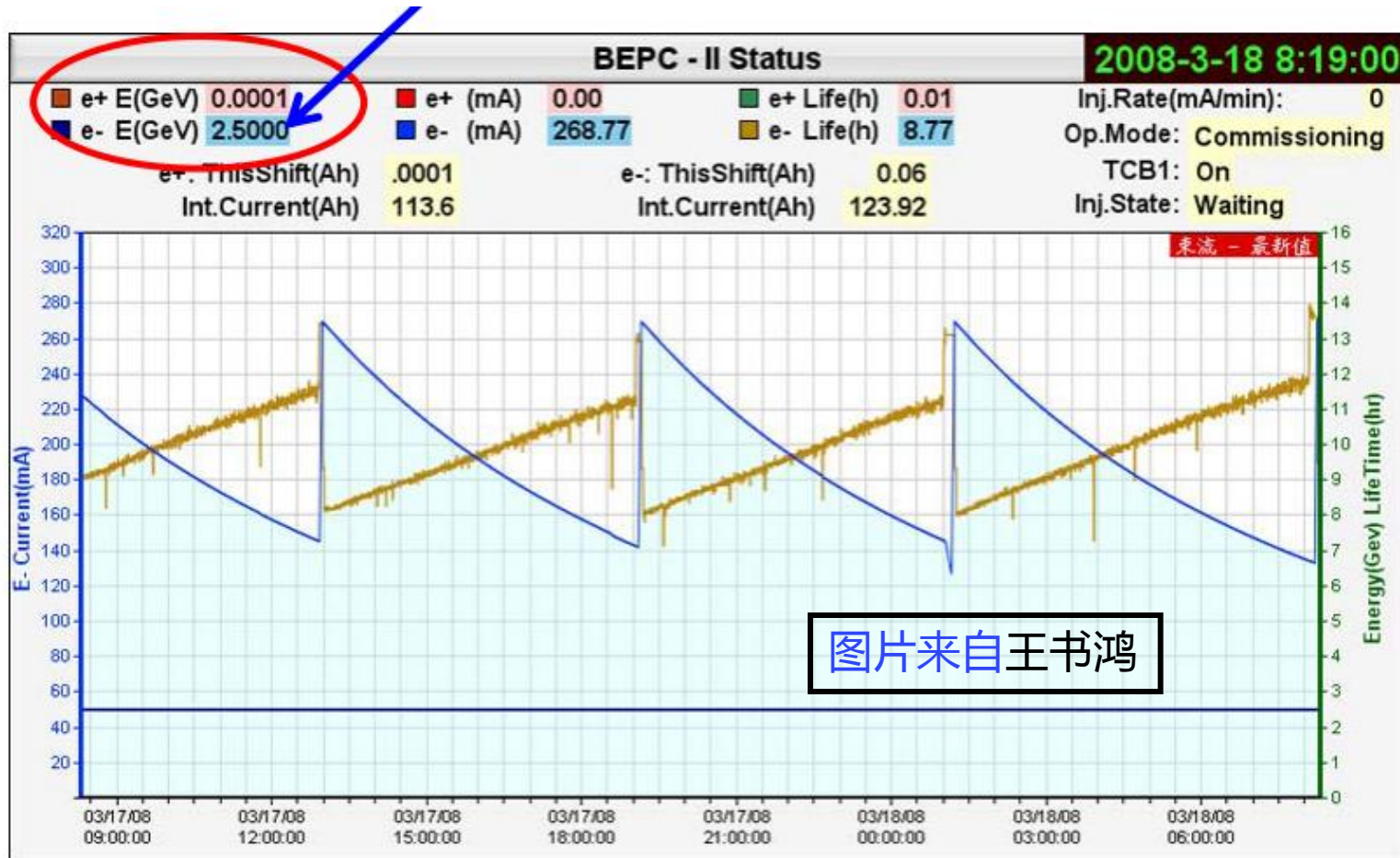
$$B = \frac{N_\gamma}{(2\pi)^{5/2} \delta_x \delta_y \theta_{\gamma_x} \theta_{\gamma_y} \tau_e} / (\text{mrad}^2 \text{mm}^2 0.1\% \text{bandwidth s}), \quad \rightarrow \quad B = \frac{N_\gamma}{(2\pi)^{5/2} \sigma_b^2 \theta_b^2 \tau_b} (s \text{mm}^2 \text{mrad}^2 0.1\% \text{BW})$$

这里 δ_i ($i = x, y$) 是电子束和激光束之间的重叠尺寸 , $\theta_{\gamma i}$ ($i = x, y$) , $\theta_{\gamma i} \cong (\Delta E_\gamma / E_\gamma)^{1/2} / \gamma_0$, 是伽玛射线的散度 (或者说辐射可在这个 $\theta_{\gamma i}$ 角度内看到) , 在我们的条件里 , 辐射带宽主要来自电子束发射度增宽 , 即 $\theta_b \cong \epsilon_n / \gamma_0 \sigma_b$ 。作为估计 , 这里分别用电子束尺寸 σ_b 代表 δ_i , 角散度 $\theta_{\gamma i}$ 用 θ_b 代表 , τ_e 是电子束团长度。上式代入电子束参数 $\sigma_b = 0.1\text{mm}$, $\tau_e = 10\text{ps}$, **得到试验束上LCS最大峰值亮度**

$$B = 1.35 \times 10^{14} (\text{mm}^2 \text{mrad}^2 0.1\% \text{BW s})$$

参考 : Sakai, T. Aoki, K. Dobashi, et al., Phys. Rev. ST, Acc. & Beam, Vol.6 091001 (2003),

五、高能所加速器运行现状 (BSRF和TBF)



目前北京同步辐射与试验束兼用模式运行，运行期间每天注入束流4次，每次耗时~5分钟之内，绝大部分时间的束流送10号厅试验束。

北京谱仪取数运行

2015/1/12

BEPCII Operating Status

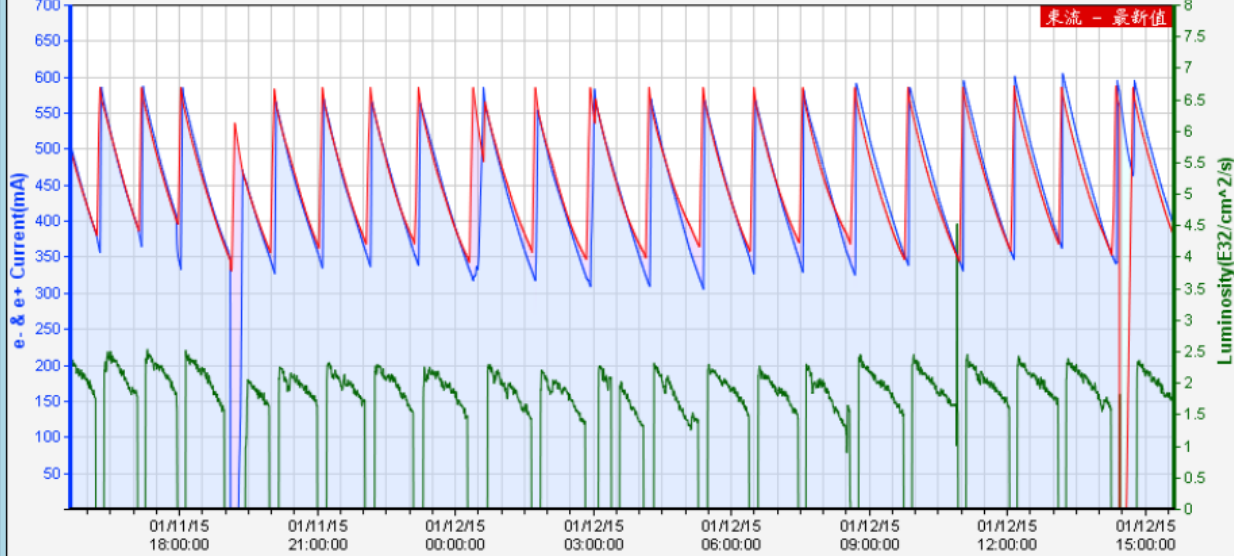
中国科学院高能物理研究所 IHEP, Chinese Academy of Sciences

北京正负电子对撞机(II)和北京谱仪(III)运行状态

BEPCII & BESIII Status

2015-1-12 15:37:52

e+ E(GeV) 1.4932	e+ (mA) 378.74	e+ Life(h) 2.30	Inj.Rate(mA/min): 0
e- E(GeV) 1.4936	e- (mA) 393.41	e- Life(h) 2.02	Op.Mode: Colliding
Lum(E32/cm^2/s) 1.74	e+: This Shift(A.h) 3.38	e-: This Shift(A.h) 3.5	TCB1: On
Int.Lum(pb^(-1)) 6995.72	Int.Current(A.h) 716.01	Int.Current(A.h) 555.95	Inj.State: Waiting



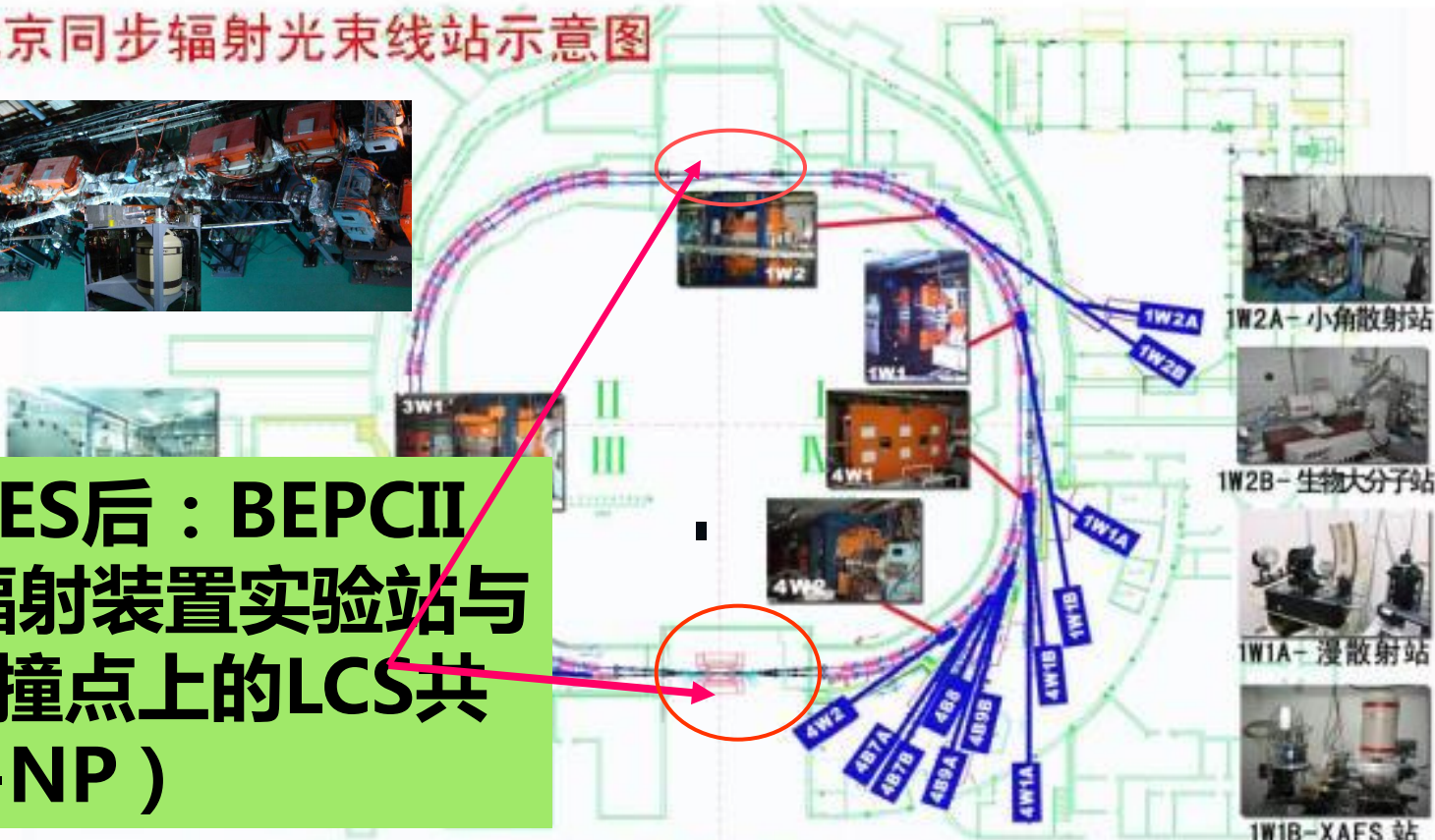
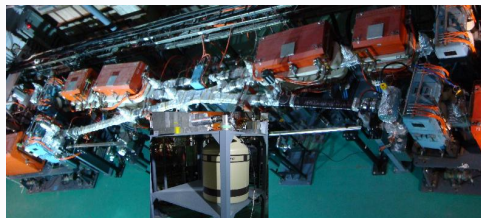
更新周期
50 seconds ▼
等待时间
6 seconds

加速器研究中心 Accelerator Research Center 直接访问本网站地址: <http://192.168.206.122/> 今天第 23 位访问者

北京谱仪目前已经经历三代，每一代运行寿命~10年，到2022年以后加速器将会有更多的时间投入同步辐射运行，到时10号厅试验束也将会有更多机时，那时我们也有条件考虑庄杰佳关于BEPC-2对撞点上直线节康普顿背散射 γ 源方案。

六，BEPCII-强伽玛光源展望（1）

北京同步辐射光束线站示意图



希望BES后：BEPCII
同步辐射装置实验站与
2个对撞点上的LCS共
生（ γ -NP）



1W2A-小角散射站



1W2B-生物大分子站



1W1A-漫散射站



1W1B-XAFS站



4W2-高压站



4B7A-中能束线



4B8-真空紫外站



4B9A-衍射站



4W1A-X射线成像站



4W1B-荧光站

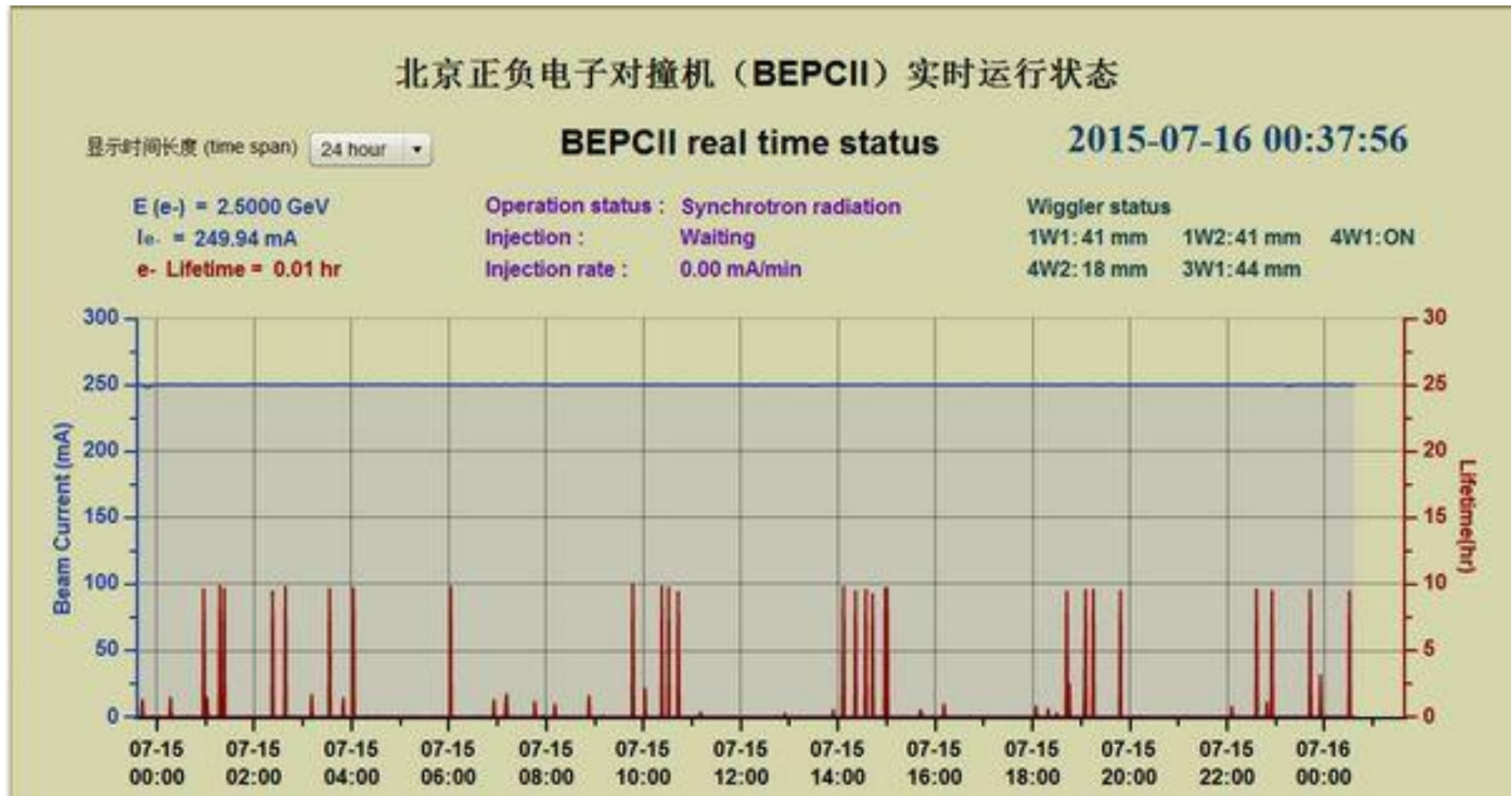


4B7B-软X光站



4B9B-光电子能谱站

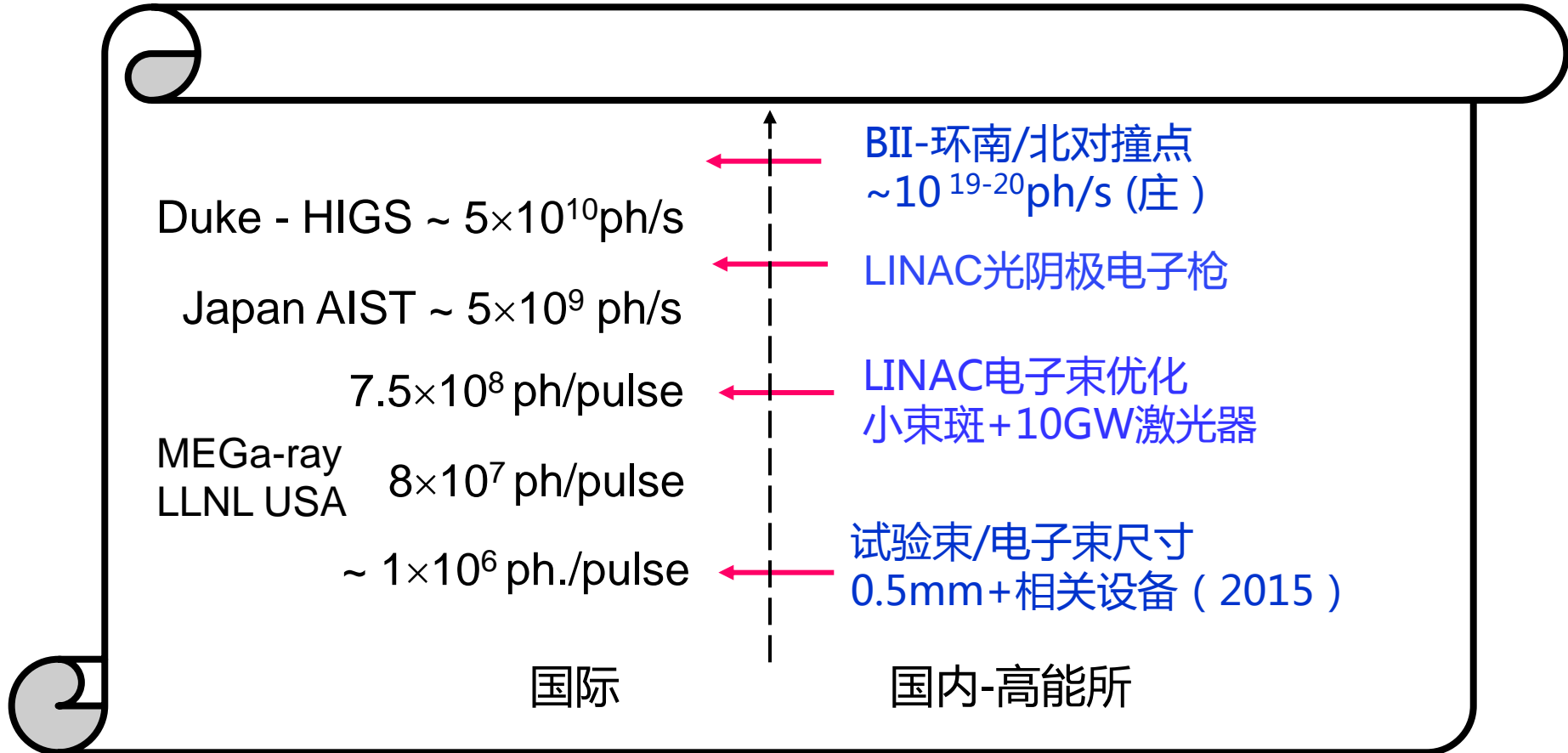
六， BEPCII-强伽玛光源展望（2）



- 目前北京同步辐射装置已成功实现恒流注入模式（Top-up）运行，对共生在BEPC环上的LCS实验站，其伽玛光子源强度和品质将是世界上亮度最高的伽玛光源之一。

小结

高能所-BEPC上的LCS**特点**是：大科学装置上**现成**的BSRF和加速器兼用（ γ -NP）运行的机器**效率**。（黑色字体是国际上已达到的伽玛源运行参数）



谢谢大家