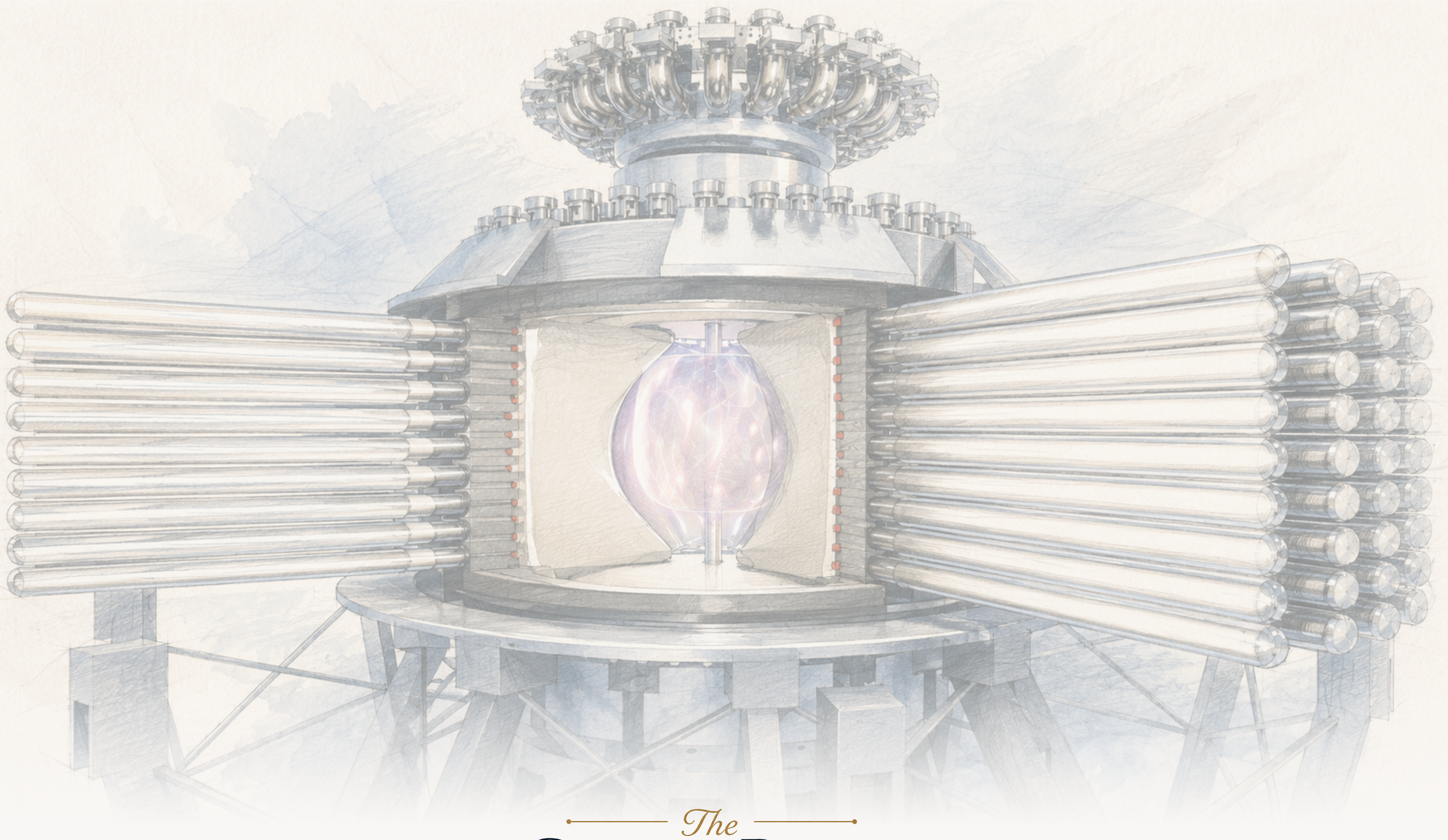


The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN’T · WHY IT MATTERS

አንድ የፊውዥን ማሽን ፕላዝማውን በመጭመቅ አሞቀው — እውነተኛው እርምጃ ይህ ነው፣ ግን የኃይል ማመንጫ ጣቢያ አይደለም

የGeneral Fusion LM26 ማግኔታዊ ዲዩቴሪየም ፕላዝማን ወደ ውስጥ በሚወድቅ የሊቲየም ሽፋን ጨመቀው፣ የኤሌክትሮን ሙቀቱም ከሦስት እጥፍ በላይ ጨምሮ በመለኪያ ወደ 0.72 keV (718 ± 80 eV፣ ወደ 8 ሚሊዮን °C) ደረሰ። የኩባንያው ትንተና አብዛኛው ማሞቅ ከጭመቁ ራሱ እንደመጣ ያመለክታል፣ ይህም የmagnetized-target-fusion አቀራረቡ ዋና ዘዴ ነው። ለዚህ መንገድ እውነተኛ የምህንድስና ፈተና ነው። ግን ይህ በአንድ ማሽን ላይ የተደረጉ የመጀመሪያዎቹ 11 ሙከራዎች ናቸው፣ በእኩዮች ያልተገመገመ የኩባንያ ቅድመ-ህትመት ላይ የተገለጹ፣ እና ሙቀቱ ራሱን የሚያስቀጥል ፕላዝማ ከሚፈልገው አሁንም ወደ አስር እጥፍ ያነሰ ነው። የተጣራ ኃይል የለም፣ breakeven የለም፣ ኤሌክትሪክም የለም። አንድ ዘዴ መስራቱ ታይቷል — የኃይል ማመንጫ ጣቢያ አልተገነባም።

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *The science of compressional heating on the LM26 magnetized target fusion experiment*, S. J. Howard et al. (General Fusion), arXiv:2606.23974 [physics.plasm-ph] (preprint) · DOI: 10.48550/arXiv.2606.23974

አንድ የፊውዥን ማሽን ፕላዝማውን በመጭመቅ አሞቀው — እውነተኛው እርምጃ ይህ ነው፤ ግን የኃይል ማመንጫ ጣቢያ አይደለም

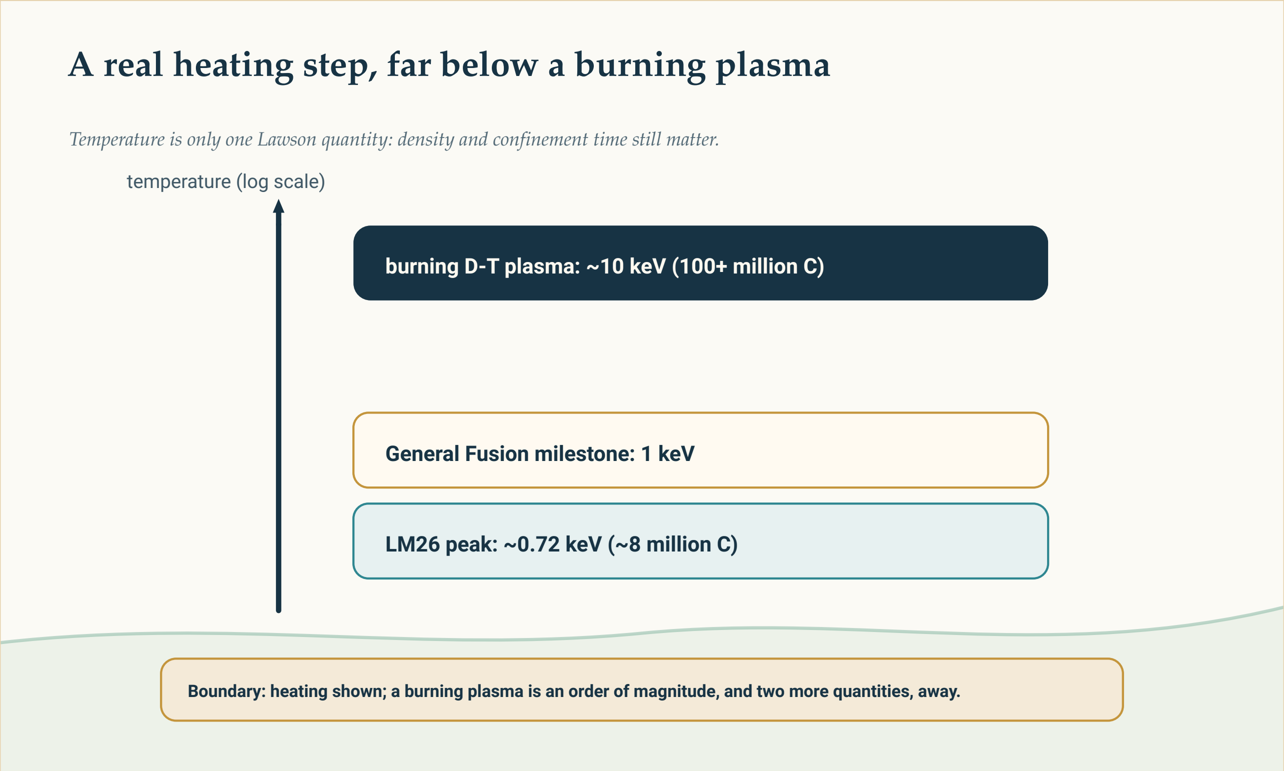
አንድ የፊውዥን ሬአክተር ለማስኬድ ከሚወስደው በላይ ኃይል እንዲመልስ፣ የነዳጅ ፕላዝማው በአንድ ጊዜ በቂ ሙቀት፣ በቂ ጥግግት እና በቂ የመያዣ ጊዜ ሊኖረው ይገባል። ፊዚክስ ባለሙያዎች እነዚህን ሦስት መጠኖች በአንድ ላይ Lawson criterion ብለው ይጠራሉ። አብዛኛው የፊውዥን ምርምር ይህን ለማሳካት እጅግ ትልቅ ሱፐርኮንዳክቲንግ ማግኔቶችን (እንደ ITER ያሉ tokamak-ዎች) ወይም ግዙፍ ሌዘሮች ስብስብን (እንደ ዩናይትድ ስቴትስ National Ignition Facility ያለው inertial confinement) ይጠቀማል። ጥቂት ኩባንያዎች ግን ሦስተኛ መንገድ ላይ ውርርድ አድርገዋል፤ ይህም magnetized ዒላማ fusion (MTF) ነው። በዚህ ዘዴ መጀመሪያ ሞቅ ያለ እና ማግኔታዊ ፕላዝማ ይፈጠራል፤ ከዚያም በፍጥነት በሜካኒካዊ መንገድ ይጨመቃል። የጭመቁ ራሱ ፕላዝማውን እንዲያሞቀው ነው የሚጠበቀው — ልክ የዲዝል ሞተር ነዳጁን በሻማ ሳይሆን በመጭመቅ እንደሚያቃጥለው።

በሰኔ 2026 የካናዳው ኩባንያ General Fusion ከ Lawson Machine 26 (LM26) ያገኛቸውን ውጤቶች አወጣ። ሙከራው የሚፈትነው የዚህን ዘዴ ዋና ግምት ነው፤ ማግኔታዊ ፕላዝማን በሜካኒካዊ መንገድ መጭመቅ ሞዴሎቹ እንደሚተነብዩት በእርግጥ ያሞቀዋልን? በመጀመሪያዎቹ 11 የጭመቃ ሙከራዎች ውስጥ፣ የሉላዊ tokamak ዲዩቴሪየም ፕላዝማ ወደ ውስጥ በሚወድቅ ጠንካራ የሊቲየም ሽፋን ተጨመቀ። በተሻሉት ሙከራዎች ፕላዝማው ሲጨመቅ በግልጽ ሁኔታ የበለጠ ሞቃት፣ የበለጠ ጥቅጥቅ እና የበለጠ ማግኔታዊ ሆነ። የኩባንያው ትንተና አብዛኛው የሙቀት መጨመር ከጭመቁ ራሱ እንደመጣ ያመለክታል።

ይህ ለMTF አቀራረብ እውነተኛና ግልጽ የምህንድስና ውጤት ነው። ነገር ግን ይህ የመጀመሪያው የሙከራ ስብስብ ነው፣ በእኩዮች ያልተገመገመ የኩባንያ ቅድመ-ህትመት ላይ የተገለጸ ነው፣ እና የተገኘው ሙቀት የራሱን ቃጠሎ የሚያስቀጥል ፕላዝማ ከሚፈልገው እጅግ ያነሰ ነው። ይህ የፊውዥን ኃይል አይደለም፣ breakeven አይደለም፣ የኃይል ማመንጫም አይደለም።

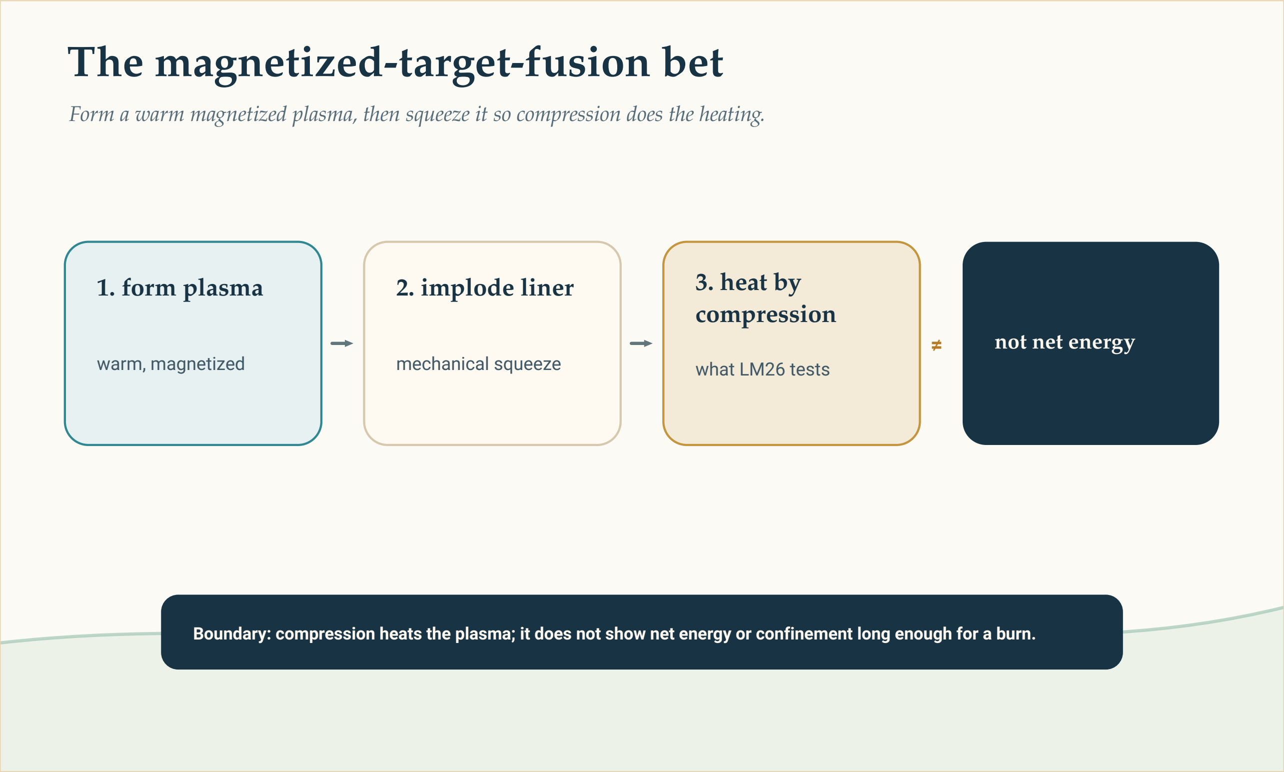
[video pending]

ይህ ከGeneral Fusion የተወሰደ የማስታወቂያ ቪዲዮ ነው፤ LM26 በአካል ምን እንደሚመስል ለማሳየት ብቻ ተካትቷል። ማሽኑ ወደፊት ያቀዳቸውን የፊውዥን ግቦች እንደሚያሳካ የሚያረጋግጥ ነፃ ማስረጃ አይደለም።



የሙቀት ደረጃዎች፤ የLM26 ~0.72 keV፣ የGeneral Fusion 1 keV ቀጣይ የግብ ደረጃ፣ እና ዲዩቴሪየም–ትሪቲየም ፕላዝማ ራሱን ለማቃጠል የሚፈልገው ~10 keV። ሙቀት ከLawson criterion ሦስቱ መጠኖች አንዱ ብቻ ነው።

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Magnetized ዒላማ fusion፤ ሞቅ ያለ ማግኔታዊ ፕላዝማ ይፈጠራል፣ ከዚያም ወደ ውስጥ በሚወድቅ ሽፋን ይጨመቃል፣ እና ጭመቁ ፕላዝማውን ያሞቀዋል — የዲዝል ሞተርን የጭመቃ ሐሳብ የሚመስል ውርርድ። LM26 የፈተነው ጭመቁ ፕላዝማውን

ያሞቀዋልን የሚለውን ነው፤ የተጣራ ኃይል ወይም በቂ የመያዣ ጊዜን አልፈተነም።

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

> **“magnetized ዒላማ fusion”፣ “keV” እና Lawson criterion ምን ማለት ናቸው?**
>
> በፊውዥን ምርምር የፕላዝማ ሙቀት ብዙውን ጊዜ በዲግሪ ሳይሆን በ kiloelectronvolts (keV) ይገለጻል፤ 1 keV ወደ 11.6 ሚሊዮን °C ይጠጋል። ዲዩቴሪየም–ትሪቲየም ነዳጅ በብቃት ፊውዥን እንዲያደርግ ወደ 10 keV (ከ100 ሚሊዮን °C በላይ) መድረስ ይፈልጋል። ነገር ግን ሙቀት ብቻውን አይበቃም። Lawson criterion ሬአክተሩ በቂ ጥግግት እና በቂ የመያዣ ጊዜ ሊኖረው እንደሚገባ ይጠይቃል፤ እነዚህም ብዙውን ጊዜ “triple product” (ሙቀት × ጥግግት × የመያዣ ጊዜ) ተብለው ይዋሃዳሉ። ፕላዝማውን ማሞቅ አስፈላጊ ነው፣ ግን ብቻውን ከበቂነት በጣም ይርቃል።
>
> Magnetized ዒላማ fusion (MTF) በሁለቱ ዋና የፊውዥን አቀራረቦች መካከል ያለ መካከለኛ መንገድ ነው። ሞቃት ፕላዝማን ረጅም ጊዜ በግዙፍ ማግኔቶች ከመያዝ ወይም አነስተኛ ዒላማን በሌዘር በቅጽበት ከማሞቅ ይልቅ፣ MTF ማግኔታዊ ፕላዝማ ይፈጥራል እና በጥቂት ማይክሮሰከንዶች ውስጥ በሜካኒካዊ መንገድ ይጨምቀዋል። ከሰራ፣ ጭመቁ ፕላዝማውን ያሞቀዋል እና ጥግግቱንም ያሳድጋል፤ ይህም ITER የሚያህሉ ማግኔቶች ወይም NIF የሚያህሉ ሌዘሮች ሳያስፈልጉ ወደ ፊውዥን ሁኔታ ሊያደርስ ይችላል። በእውነተኛ ማሽን ውስጥ ጭመቁ ይህን ማሞቅ በእርግጥ እንደሚያመጣ መፈተን በትክክል LM26 ያለ ሙከራ የተሰራለት ነው።

ደራሲዎቹ ምን አደረጉ?

- በGeneral Fusion ውስጥ የmagnetized-ዒላማ-fusion ማሽን የሆነውን LM26 ገንብተው አስኬዱ። የሉላዊ tokamak ዲዩቴሪየም ፕላዝማ ይፈጠራል፣ ከዚያም ወደ ውስጥ በሚነዳ እና ወደ ውስጥ በሚወድቅ ጠንካራ የሊቲየም ሽፋን ይጨመቃል — በራዲየስ ወደ 3× ጭመቃ።
- መጀመሪያዎቹን 11 የጭመቃ ሙከራዎች አካሄዱ፣ ብዙ የመለኪያ መሣሪያዎችንም አስገቡ። የፕላዝማውን ሙቀት፣ ጥግግት እና ማግኔታዊ መስክ በጊዜ ሂደት እንደገና ገነቡ፤ የሚወጡ ኒውትሮኖችን፣ X-ray፣ የሚታይ ብርሃንን እና የፕላዝማ–ግድግዳ ግንኙነትን የሚያሳዩ ፈጣን ካሜራ ምስሎችን መዘገቡ።
- ከጭመቃ የሚመጣውን ሙቀት፣ ከፕላዝማው የራሱ ኤሌክትሪክ ፍሰት የሚመጣውን Ohmic ማሞቅ እና ወደ ድንበሩ የሚጠፋውን ኃይል የሚያመዛዝን የተዋሃደ የፊዚክስ ሞዴል ሠሩ። ከዚያም ሞዴሉን ከመለኪያዎቹ ጋር በማነጻጸር ሙቀቱ በእውነት ከየት እንደመጣ ለመለየት ሞከሩ።

ምን አገኙ?

- ፕላዝማው ሲጨመቅ ሞቀ። በተሻሉት ሙከራዎች የኤሌክትሮኖች ሙቀት ከ3× በላይ፣ የኤሌክትሮን ጥግግት ወደ 10×፣ የpoloidal ማግኔታዊ መስክም ወደ 10× አደገ፤ ይህ በ3× የራዲየስ ጭመቃ ተነሳሳ። በተሻለው ሙከራ ጽሑፉ ወደ 0.72 keV **የሚደርስ ከፍተኛ የኤሌክትሮን ሙቀት** (718 ± 80 eV፣ በThomson scattering የተለካ) ዘግቧል — ወደ 8 ሚሊዮን °C።
- አብዛኛው ማሞቅ ከጭመቃ እንደመጣ ተገምቷል። የተዋሃደው ሞዴል የሙቀት ጭማሪው ከግማሽ በላይ ከሜካኒካዊ ጭመቁ ራሱ እንደመጣ ይደመድማል፤ ይህም የMTF አቀራረብ የሚመሠረትበት ዋና ዘዴ ነው። Ohmic ማሞቅ ዋናው ምንጭ እንዳልነበረ ሞዴሉ ያመለክታል።
- በጭመቃው ጊዜ የኒውትሮን ልቀት ጨመረ፤ ይህም የበለጠ ሞቃትና ጥቅጥቅ ከሆነ ዲዩቴሪየም ፕላዝማ ጋር የሚጣጣም

ነው።

ይህ ምን አያሳይም?

- ይህ የፊውዥን ኃይል፣ breakeven ወይም የተጣራ የኃይል ትርፍ አይደለም። ከማሽኑ ማስኬጃ ኃይል የበለጠ ኃይል አልተመረተም። ውጤቱ ፕላዝማን ማሞቅ ላይ ነው — ይህ በፊውዥን ሂደት ውስጥ አንድ ደረጃ ነው፣ የሬአክተር የኃይል ሚዛን አይደለም።
- ሙቀቱ አሁንም ራሱን የሚያስቀጥል ፕላዝማ ከሚፈልገው ወደ አስር እጥፍ ያነሰ ነው። 0.72 keV ወደ 8 ሚሊዮን °C ነው፤ ዲዩቴሪየም–ትሪቲየም ነዳጅ ወደ 10 keV (ከ100 ሚሊዮን °C በላይ) እና ቃጠሎውን ለማስቀጠል በቂ ጥግግት × የመያዣ ጊዜ ይፈልጋል። General Fusion ያስቀመጠው ቀጣይ ግብ 1 keV ነው — ይህም እንኳን ignition ከሚፈልገው በጣም ይርቃል።
- “አብዛኛው ማሞቅ ከጭመቃ መጣ” የሚለው በሞዴል ላይ የተመሠረተ መደምደሚያ ነው፣ ቀጥተኛ የመለኪያ ንባብ አይደለም። ይህ ከመለኪያዎቹ ጋር የተጣጣመ የተዋሃደ የፊዚክስ ሞዴል የሚሰጠው ውጤት ነው። ጭመቃ፣ Ohmic ማሞቅ እና የኃይል ኪሳራ መካከል ያለውን ክፍፍል ምን ያህል እንደሚያምኑት በሞዴሉ ላይ ባላችሁ እምነት ይወሰናል።
- ይህ የኩባንያ ቅድመ-ህትመት ነው፣ በእኩዮች አልተገመገመም። ውጤቶቹ ማሽኑን የገነባውና በተስፋው ላይ ገንዘብ ያሰባሰበው ቡድን ራሱ ያቀረባቸው ናቸው፤ ነፃ ግምገማ ገና አልተደረገም።
- የኒውትሮን መጨመሩ ለኃይል ምርት ተዛማጅ የፊውዥን ምርት አይደለም። በእነዚህ ሁኔታዎች ከዲዩቴሪየም ጥቂት ኒውትሮኖች መፍጠር የሚጠበቅ ነው፣ ግን ለኃይል ማመንጨት ከሚጠቅም ደረጃ እጅግ ይርቃል።
- ኩባንያው በተለየ መግለጫ ወደፊት የሚገነባ ጣቢያ ወደ ኤሌክትሪክ መረብ ኃይል ያቀርባል ብሎ ያቀረበውን አባባል ይህ ጥናት አይደግፍም። ነፃ የዜና ዘገባዎች ይህን አባባል በብዙ ጥንቃቄ ተመልክተዋል።

ማስረጃው ምን ያህል ጠንካራ ነው?

- ዋናው አባባል ጠባብና ሊፈተን የሚችል ነው። “ማግኔታዊ ፕላዝማን ጨመቅን፣ ሞቀም፣ እና አብዛኛው ሙቀት ከጭመቁ መጣ” የሚለው MTF ሊያልፈው የሚገባው የዘዴ ፈተና በትክክል ነው። ጽሑፉም ብዙ መለኪያዎች ያሉባቸውን ሙከራዎች እና ግልጽ የኃይል ሚዛን ሞዴል ያቀርባል። በእኩዮች ግምገማ ካለፈ፣ ይህ ቀደምት ቢሆንም ለአቀራረቡ እውነተኛ ማረጋገጫ ነው።
- ገደቦቹ የሥራው መዋቅር አካል ናቸው፣ የውበት ማስተካከያ አይደሉም። 11 ሙከራዎች፣ አንድ ማሽን፣ አንድ ቡድን፣ ገና ያልተገመገመ ጽሑፍ፣ እና ከራሱ ቃጠሎ ፕላዝማ የሚፈልገው በአንድ የአስር ስፋት ያነሰ ሙቀት። ዋናው መደምደሚያ — አብዛኛው ማሞቅ ከጭመቃ መጣ — በሞዴል ላይ ይተማመናል። ስለዚህ በእኩዮች ግምገማ ላይ ዋናው ጥያቄ ይህ ክፍፍል ምን ያህል ጠንካራ እንደሆነ ይሆናል።
- በትክክል ሲገለጽ፣ የታየው አንድ ዘዴ መስራቱ ነው፤ የኃይል ምርት ደረጃ መድረሱ አይደለም። MTFን “ጭመቁ ፕላዝማውን ማሞቅ አለበት” ከሚል ደረጃ ወደ “ጭመቁ ፕላዝማውን ያሞቀዋል” የሚል ማስረጃ ትንሽ ያቀርበዋል። ከዚያ የበለጠ ግን አይደለም።

ለምን ይጠቅማል?

በmagnetized ዒላማ fusion ውስጥ አስደሳቹ ጉዳይ የሪከርድ ውድድር ሳይሆን ኢኮኖሚክስ ነው። ሜካኒካዊ ጭመቃ ፕላዝማን ወደ ፊውዥን ሁኔታ ማሞቅ ከቻለ፣ ITER የሚያህሉ ማግኔቶች ወይም NIF የሚያህሉ ሌዘሮች ሳያስፈልጉ ወደዚያ ሊደረስ ይችላል — የበለጠ ርካሽ እና በፍጥነት ሊሻሻል የሚችል መንገድ፣ ከሰራ። ሙሉ ጉዳዩ ያለው በዚያ “ከሰራ” ውስጥ ነው። ይህም እንደዚህ ባሉ ብዙም የማያበሩ መካከለኛ ፈተናዎች ይወሰናል፤ ጭመቁ ሞዴሎቹ የሚተነብዩትን ማሞቅ በእውነት ያመጣልን? የLM26 መጀመሪያ ሙከራዎች የሚሰጡት መልስ “አዎ፣ ግን ከገደቦች ጋር” ነው። እና ትክክለኛው አስፈላጊነቱ ያለው በዚህ ገደብ ውስጥ ነው፤ በረጅም መሰላል ላይ አንድ ደረጃ፣ ራሳቸው የሚወጡበትን መሰላል በሚወጡ ሰዎች የተዘገበ፣ በሌላ አካል ገና ያልተፈተሸ፣ እና ከጫፉ በጣም የራቀ።

ንጹህ ማጠቃለያ

የGeneral Fusion LM26 ማግኔታዊ ዲዩቴሪየም ፕላዝማን ወደ ውስጥ በሚወድቅ የሊቲየም ሽፋን ጨመቀው፣ ፕላዝማውም ሲሞቅ ታየ — የኤሌክትሮን ሙቀቱ ከሦስት እጥፍ በላይ ጨምሮ በመለኪያ ወደ 0.72 keV (718 ± 80 eV፣ ~8 ሚሊዮን °C) ደረሰ። የኩባንያው ትንተና አብዛኛው ማሞቅ ከጭመቁ ራሱ እንደመጣ ያመለክታል፤ ይህም የmagnetized-ዒላማ-fusion አቀራረቡ የሚመሠረትበት ዘዴ ነው። ለዚህ የፊውዥን መንገድ ይህ እውነተኛና ግልጽ የምህንድስና እርምጃ ነው። ነገር ግን በአንድ ማሽን ላይ የተደረጉ የመጀመሪያዎቹ 11 ሙከራዎች ብቻ ናቸው፣ በእኩዮች ያልተገመገመ የኩባንያ ቅድመ-ህትመት ላይ የተገለጹ፣ እና የተገኘው ሙቀት ራሱን የሚያስቀጥል ፕላዝማ ከሚፈልገው ወደ አስር እጥፍ ያነሰ ነው። የተጣራ ኃይል የለም፣ breakeven የለም፣ ኤሌክትሪክም አልተመረተም። አንድ ዘዴ መስራቱ ታይቷል — የኃይል ማመንጫ ጣቢያ አልተገነባም።

ምንጮች

S. J. Howard et al. (General Fusion), The science of compressional heating on the LM26 magnetized target fusion experiment, arXiv:2606.23974 [physics.plasm-ph] (2026)
https://arxiv.org/abs/2606.23974

General Fusion, ’General Fusion Achieves Compressional Plasma Heating with LM26 Magnetized Target Fusion Machine’ (company announcement, June 2026)
https://generalfusion.com/post/general-fusion-achieves-compressional-plasma-heating-with-lm26-magnet

Nature news, ’Nuclear-fusion firm says plant will deliver electricity to grid - but big questions remain’ (2026)
https://www.nature.com/articles/d41586-026-01795-z