An open-access APC-free journal
ISSN: 2981-8184

REVIEW PAPER

Dark Matter and Dark Energy: Introduction, Development, and Gravitational Lensing

Ragib A. Khan
Freelance Author and Researcher
Vienna, Austria, +43

Correspondence: Ragib. A. Khan
Email: ragibahsankhan@gmail.com

Received: 4/15/2024; Accepted: 6/7/2024

DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.12735764

Abstract

Scientists have solidified their understanding of dark matter and energy, confirming their existence. However, while dark energy has been observed and verified, dark matter remains elusive. The characteristics of these phenomena are still not fully comprehended, with dark matter remaining a theoretical construct. This article offers a summary of the historical context and contemporary advancements in the theories of dark matter and dark energy, along with the current areas of research, methodologies, preliminary scientific hypotheses, and key research techniques such as gravitational lensing for studying dark matter and energy.

Keywords: Baryonic matter, non-baryonic matter, MACHOs, WIMPs, gravitational lensing, thermal relics

Citation: *B1-B9. Khan, R.A. 2024, Dark Matter and Dark Energy: Introduction, Development, and Gravitational Lensing, Bangla J. Interdisciplinary Sci., 2 (1): B10-B40.*

ডার্ক মেটার এবং এনার্জির সংক্ষিপ্ত পরিচিতি, ক্রমবিকাশ এবং মহাকর্ষীয় লেন্সিং

সারাংশ

বিজ্ঞানীরা ডার্ক মেটার এবং ডার্ক এনার্জীর বাস্তব অস্তিত্ব সম্পর্কে সুনিশ্চিতভাবে জানতে পেরেছেন। অবশ্য ডার্ক এনার্জীর অস্তিত্ব তাঁরা পর্যবেক্ষণগতভাবে প্রমাণ করতে পেরেছেন, কিন্তু ডার্ক মেটার অস্তিত্বকে এখনো পর্যবেক্ষণগত ভাবে প্রমাণ করতে পারেননি। ডার্ক মেটার বিষয়টি এখন পর্যন্ত তাত্ত্বিক প্রকল্প মাত্র। এই প্রবন্ধে প্রথমে ডার্ক মেটার এবং ডার্ক এনার্জী তত্ত্বের বিকাশের ঐতিহাসিক প্রেক্ষাপট এবং আধুনিক বিকাশের ক্রমধারাকে সংক্ষেপে তুলে ধরা হয়েছে। এরপর ডার্ক মেটার এবং ডার্ক এনার্জী কাজের এলাকা, মাধ্যম-পদ্ধতিসহ বৈজ্ঞানিক (প্রাকল্পিক) সিদ্ধান্তগুলির পরিচয় অতি সংক্ষেপে তুলে ধরা হয়েছে, এবং ডার্ক মেটার এবং ডার্ক এনার্জীর ওপর গবেষণার অন্যতম মূল মাধ্যম-পদ্ধতি গ্রেভিটেশন্যাল লেন্সিং (Gravitational Lensing, GL) এর একটা সংক্ষিপ্ত পরিচিতি তুলে ধরা হয়েছে।

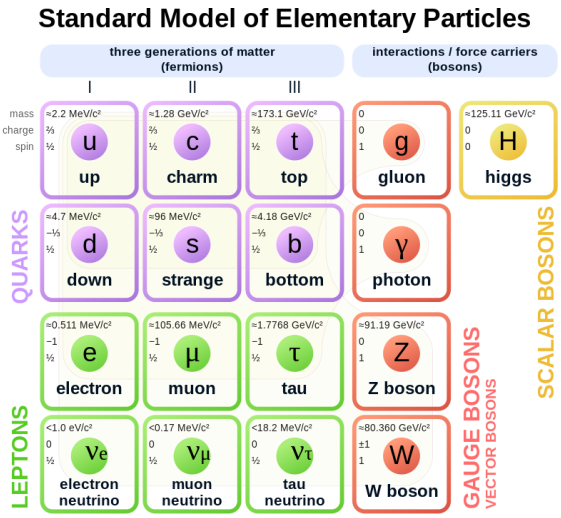
মূল শব্দগুলি: ব্যরিয়নিক ও নন-ব্যরিয়নিক উপাদান, MACHOs, WIMPs, Gravitational Lensing, Thermal Relics

ভূমিকা

ডার্ক মেটার এবং ডার্ক এনার্জী বিদ্যুৎ চুম্বকীয় ক্ষেত্রের সাথে কোনো ক্রিয়া প্রতিক্রিয়া করে না; আলো বিকিরণ, শোষণ বা প্রতিফলনও করেনা, যেকোনো ব্যারিয়নিক উপাদানের সাথে কোনো ক্রিয়া-প্রতিক্রিয়া করে না। এটি বিকর্ষণধর্মী এবং নন-ব্যরিয়নিক । তাই এখন পর্যন্ত এদেরকে প্রযুক্তি ও পদ্ধতির মাধ্যমে প্রত্যক্ষভাবে শনাক্ত করা যায় নি। বিজ্ঞানীরা প্রধাণত কণাপদার্থবিদ্যা, জ্যোতিপদার্থ বিদ্যা (Astrophysics), জ্যোতির্বিদ্যা (Astronomy), স্যাটেলিট থেকে প্রাপ্ত তথ্য-উপাত্ত্ব, GL (Gravitational Lensing) প্রযুক্তি-পদ্ধতি এবং CMBR (Cosmic Microwave Background Radiation) বিকিরণের তথ্য-উপাত্তের সহায়তায় ডার্ক এনার্জী এবং ডার্ক মেটারের ওপর গবেষণা করছেন। তবে সাম্প্রতিক বিশ্বে বিজ্ঞানীরা এই উপাদান দুটিকে শনাক্ত করতে আরো বেশ কিছু প্রযুক্তি ও পদ্ধতি আবিষ্কার করেছেন।

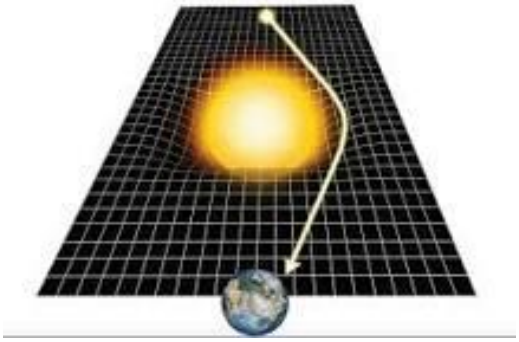
স্টার্ন্ডার্ড মডেল অনুযায়ী এই মহাবিশ্ব ১৭টি সাব এটমিক কণা দ্বারা গঠিত (চিত্র ১)। এগুলি হলো ব্যারিয়ন উপাদান। এগুলির বৈশিষ্ট্য হলো- এগুলি পর্যবেক্ষণ করা যায়, এদের ভর আছে, এরা আলো বিকিরণ করে, আলো শোষণ বা প্রতিফলন-প্রতিসরণ করে এবং বিদ্যুৎ-চুম্বকীয় ক্ষেত্রের সাথে ক্রিয়া প্রতিক্রিয়া করে। আবার মহাবিশ্বের কালোগহ্বর, নিউট্রন তারা White dwarf, Brown dwarf ইত্যাদি মহাজাগতিক বস্তুগুলিকেও ব্যারিয়ন উপাদানের অন্তর্ভূক্ত করা হয়। বিজ্ঞানের ভাষায় এগুলিকে বলে MACHOs (Massive Compact Halo Objects)।

অন্যদিকে নন ব্যারিয়ন কণাগুলি এখনো অনাবিষ্কৃত। এগুলি এখনো প্রাকল্পিক পর্যায়ে রয়েছে। ধারনা করা হয় নন ব্যারিয়ন কণাগুলি ব্যরিয়ন কণার চেয়ে ক্ষুদ্রতর। বিজ্ঞানের ভাষায় এই কণাগুলিকে বলা হয় WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)। যেমন- একসিয়ন (Axion), নিউট্রিনো (Neutrino), স্টেরাইল নিউট্রিনো (Sterile Neutrino), নিউট্রালিনো (Neutralino), এস-পার্টিকেলস (S-Particles) সুপার-পার্টনারস (Super-partners), ইত্যাদি।



চিত্র ১: Standard Model of Particle Physics (Credit: Wikipedia, 2024a) ।

মহাবিশ্বে প্রচন্ড ভারি বস্তুগুলির বিশাল ভরের কারণে বস্তুগুলির আশেপাশের দেশ-কালে বক্রতার সৃষ্টি হয়। যখন অন্য কোনো মহাজাগতিক ভারী বস্তু থেকে নির্গত রশ্মি এই বক্র দেশ-কালের মধ্য দিয়ে অতিক্রম করে, তখন সামান্য পরিমাণে বেঁকে যায়; এই প্রক্রিয়াটিই হলো GL (চিত্র ২)। যেমন- কোনো ক্লস্টারের পাশ দিয়ে যখন অন্য কোনো বস্তুর বিকিরণ অতিক্রম করে তখন GL এর সৃষ্টি হয়। এই তথ্য উপাত্ত থেকে বিজ্ঞানীরা ঐ মহাজাগতিক উপাদানটির আকর্ষণ শক্তির পরিমাণ নির্ণয় করতে পারেন এবং সেই শক্তির পরিমাণ থেকে, গাণিতিকভাবে হিসাব-নিকাশ করে, উপাদানটির ভরও নির্ণয় করতে পারেন। গাণিতিকভাবে হিসাব করে বিজ্ঞানীরা সিদ্ধান্তে পৌঁছেন যে, সেখানে শক্তির অনুপাতে যে পরিমাণ ভর থাকার কথা, সেখানে তার চেয়ে অনেক কম ভর আছে। এই তথ্যের ভিত্তিতেই বিজ্ঞানীরা "missing mass" এর ধারনায় পৌঁছেন এবং এগুলিকেই তারা ডার্ক মেটার এবং ডার্ক এনার্জী নামকরণ করেন। এই ডার্ক এনার্জী ও ডার্ক মেটার আবিষ্কারের পূর্ব প্রেক্ষাপট ও ক্রমবিকাশের একটি সংক্ষিপ্ত বর্ণনা দেওয়া যাক।



চিত্র ২: As photons pass through the area near a massive object causing significant distortion, their path bends because of the curvature of the space-time they travel through. (Image Credit: Kell, 2019)।

ডার্ক মেটার (Dark Matter): পূর্ব প্রেক্ষাপট

শক্তি ও বস্তু ওতপ্রোতভাবে জড়িত। শক্তি বস্তুর পরিবর্তিত রূপ, অন্যদিকে শক্তি থেকেই বস্তুর উদ্ভব। তাই শক্তিকে জানতে হলে প্রথমে বস্তুকে অর্থ্যাৎ শক্তির আদি কণাকে জানতে হবে। শক্তির উৎস বা আদি কণাকে জানা না থাকলে শক্তির স্বরূপ ও চরিত্রকে সঠিকভাবে জানা সম্ভব নয়। বস্তুতঃ ডার্ক মেটার ডার্ক এনার্জীর ক্ষেত্রে বিজ্ঞানীরা তাত্ত্বিকভাবে প্রথমে শক্তির অস্তিত্বকে আবিষ্কার করেন এবং তার প্রেক্ষাপটে যৌক্তিক প্রক্রিয়ায় অনুমান করেন, শক্তির বাহক বা উৎস হিসেবে এখানে কোনো বস্তুগত উপাদানেরও অস্তিত্ব থাকতে হবে। শুরুতে ডার্ক মেটার এবং ডার্ক এনার্জীর গবেষণার ক্ষেত্রে এই অবস্থাটিরই সৃষ্টি হয়েছিল।

ডার্ক এনার্জীর আধুনিক ইতিহাস ব্রিটিশ বিজ্ঞানী উইলিয়াম থমসন কেলভিনের লেখা থেকে প্রথম শুরু হয়। কেলভিন ১৮৮৮ সালে "Baltimore Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light" নামে যে গ্রন্থটি লেখেন, সেখানে তিনি প্রথম বলেন, মহাকাশে যে অসংখ্য বস্তুরাজি বর্তমান, তার একটা বিশাল অংশ সম্ভবত কালো উপাদান (Dark Body)। তিনি এখানে প্রথম আমাদের গ্যালাক্সি, মিল্কিওয়ে এর কালো উপাদান-এর পরিমাপের চেষ্টা করেন। তিনি প্রথম ছায়াপথের পর্যবেক্ষণক্ষম তারাগুলির বেগের (Velocity) পরিমাপ করেন। তারপর তিনি তারাগুলি কত দ্রুত গ্যালাক্সির কেন্দ্রকে পরিভ্রমণ করছে, তার পরিমাপ করেন এবং লক্ষ্য করেন গ্যালাক্সির শক্তির পরিমানের কারণে গ্যালাক্সিতে যে পরিমাণ বস্তুগত উপাদান থাকার কথা, তার তুলনায় সেখানে বস্তুগত উপাদানের পরিমাণ অনেক কম। কিন্তু সেখানে কোনো উপাদানের অস্তিত্ব থাকতেই হবে, নয়তো ওই পরিমাণ শক্তি সেখান থেকে উৎপন্ন হতে পারে না। এই অদৃশ্য (Invisible) বস্তুগত উপাদানগুলিকেই তিনি ডার্কবডি (Dark Body) নামকরণ করেন। তিনি এখানে বলেন, "Many of our supposed thousand million Stars, perhaps a great majority of them, may be dark bodies" (Kevin, 1904)।

১৯০৬ সালে ফ্রেঞ্চ বিজ্ঞানী Henri Poincaré কেলভিনের গবেষণা পত্রটি দ্বারা অত্যন্ত প্রভাবিত হন এবং একই বিষয়ের ওপর "The Milky Way and Theory of Gases" নামে একটি গবেষণপত্র প্রকাশ

করেন, যার শব্দগত অর্থ হলো "Dark Matter"। যদিও তিনি সেখানে কেলভিনের সিদ্ধান্তের সাথে দ্বিমত প্রকাশ করেন, কিন্তু তিনিও স্বল্প পরিমাণ ডার্ক মেটারের অস্তিত্বের পক্ষে কথা বলেন। তাঁর বক্তব্য অনুযায়ী ডার্ক মেটারের অস্তিত্ব আছে, কিন্তু বিজ্ঞানী কেলভিনের হিসাবে ভুল হয়েছে। তিনি বলেছেন যেহেতু বিজ্ঞানী কেলভিন কেবল টেলিস্কোপের ডাটার ওপর নির্ভর করে সিদ্ধান্তে পৌঁছেছেন, সেহেতু বলা যায় ডার্ক মেটারের কোনো অস্তিত্ব নেই। মহাবিশ্বের গ্যাসীয় উপাদানের অস্তিত্ব এবং অদৃশ্য মহাজাগতিক বস্তুরাজিকে টেলিস্কোপের মাধ্যমে শনাক্ত করা যায় না। তাই ঐ উপাদানদ্বয়ের মাধ্যমে মহাবিশ্বে শক্তি ও ভরের অসাম্যতার একটা সমাধান হতে পারে। অবশ্য তিনি নিজের সিদ্ধান্তকেও প্রকল্প বলেছেন। উপসংহারে তিনি বলেছেন "But how shall we reconcile that with what we have said above about the absence of dark matter in considerable proportion? ….. I content myself with pointing out the difficulty without pretending to solve it; I will close then with a great interrogation point. The more so as it is interesting to states problems even when the solution of them seems very far distant?" (Poincare, 1906)।

ডার্ক মেটারের অস্তিত্বের প্রশ্নে পরবর্তী গুরুত্বপূর্ণ গবেষণাটি করেন হল্যান্ডের বিজ্ঞানী Jacobus Kapteyn, ১৯২২ সালে। তিনিও এখানে ডার্ক মেটারের অস্তিত্বের ভবিষ্যৎবাণী করেন। তিনি "First attempt at a theory of the arrangement and motion of the sidereal system" প্রবন্ধের Abstract এ লিখেছেন "It is incidentally suggested that when the theory is perfected it may be possible to determine the amount of dark matter from its gravitational effect." তিনিই প্রথম এই বস্তু এবং শক্তির শনাক্তকরণে Gravitational effect পদ্ধতি প্রস্তাব করেন (Kapetyn, 2022)।

১৯৩০ সালে সুইডেনের বিজ্ঞানী Kunt Lundmark গাণিতিক পদ্ধতিতে হিসাব করে বলেন এই মহাবিশ্বের পরিদৃশ্যমান উপাদানের চেয়ে অদৃশ্য উপাদানের পরিমাণ অনেক বেশি। তিনি তাঁর গবেষণায় পাঁচটি গ্যালাক্সির সর্বোচ্চ ঔজ্জ্বল্য থেকে তাদের ভর ও বিকিরণের হার নির্ণয় করেন। তিনি যে নক্ষত্রগুলির ঔজ্জ্বল্য কিছুক্ষণের জন্য আকস্মিকভাবে বৃদ্ধি পায় (Novae) সেগুলিকে নির্বাচন করেছিলেন। এখানে তিনি ভর ও বিকিরণের হারের মধ্যে একটা বিশাল পার্থক্য পর্যবেক্ষণ করেন। এই তথ্য-উপাত্তগুলির প্রেক্ষাপটে তিনি বলেন, মহাকাশের জ্যোতিপদার্থ সিস্টেমগুলিতে (Astrophysics) একটা বিশাল পরিমাণ অদৃশ্যবস্তুর অস্তিত্ব আছে (Bertone and Hopper, 2016)।

১৯৩২ সালে বিজ্ঞানী Jan Oort Doppler Shifts প্রক্রিয়ার মাধ্যমে ডার্ক মেটারের অস্তিত্বের পর্যবেক্ষণগত প্রমাণ করার সম্ভাবনার ইংগিত পান। এখানে তিনি তারাগুলির বর্ণালি পরীক্ষা করে দেখেন তারাগুলির যে গতিতে চলার কথা, তার চেয়ে অনেক দ্রুতগতিতে চলছে। তিনি আরো বলেন গ্যালাক্সিগুলিতে অবশ্যই অদৃশ্য ভরের অস্তিত্ব আছে, যেগুলির কারণে তারাগুলি সংঘবদ্ধভাবে থাকতে পারে (NASA, 2005)।

তারপরই, ১৯৩৩ সালে এই প্রশ্নের ওপর মাইলস্টোন গবেষণাটি করেন ক্যালটেকের বিজ্ঞানী Fritz Zwicky। তিনিই প্রথম পরোক্ষ পর্যবেক্ষণগত পরীক্ষার মাধ্যমে ডার্ক মেটার এবং এনার্জীর ওপর আধুনিক গবেষণার সুত্রপাত করেন; এবং তাঁরই প্রদর্শিত ধারায় পরবর্তী বিজ্ঞানীরা গবেষণা করেছেন।

Hubble এবং Humason ১৯৩১ সালে Red Shifts প্রক্রিয়ার মাধ্যমে বিভিন্ন গ্যালাক্সির ক্লস্টারের আপাত বেগ (Apparent Velocities) নির্ণয় করেন; সেখানে তাঁরা পর্যবেক্ষণ করেন কমা ক্লস্টারের আটটি গ্যালাক্সির আপাত বেগের ডাটায় গড়মিল (Discrepancy) আছে। এই পরিমাণটি ছিল 1000km/s। বিজ্ঞানী হাবল এবং হুমাসন এর ব্যাখ্যা দিতে পারেননি।

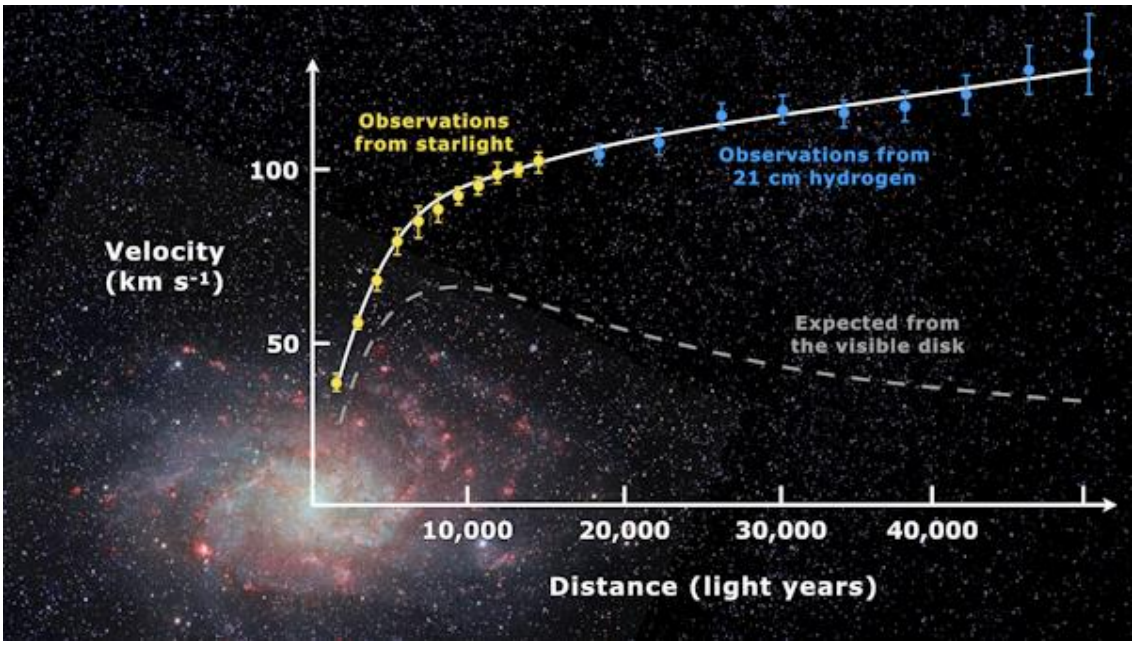
ৎসুয়িকি ১৯৩৩ সালে হাবল এবং হুমাসন কর্তৃক সংগৃহীত বিভিন্ন গ্যালাক্সির রত্তিম সরনের ডাটাগুলি অধ্যয়ন করেন এবং একটা সমাধান প্রস্তাব করেন। সেখানে তিনি তাঁদের পরিমাপে একটি বিরাট অসংগতি লক্ষ্য করেন। তিনি তাপগতিবিদ্যার (Thermodynamics, QCD) ভিরিয়াল থিউরেম এর মাধ্যমে কমা ক্লস্টারের আটটি গ্যালাক্সির ভর-বেগ নির্ণয় করেন এবং লক্ষ্য করেন, সেখানে বস্তুগত সমস্টির তুলনায় অনেক বেশি ভর-বেগ আছে এবং এই সিদ্ধান্তের যৌক্তিক অণুসিদ্ধান্ত হলো, নিশ্চয় এখানে আরো প্রচুর পরিমাণে অদৃশ্য বস্তুর অস্তিত্ব আছে! এখানে তিনি সিদ্ধান্তে বলেন "If this would be confirmed we would get the surprising result that dark matter is present in much greater amount than luminous matter। ৎসুয়িকি ১৯৩৭ সালে এই বিষয়ের উপরই আরেকটি গবেষণাপত্র প্রকাশ করেন এবং আরো পরিশিলিত ও উন্নত ডাটা উপস্থাপন করেন (Bertone and Hopper, 2016)।

ৎসুয়িকির গবেষণাটির পর এই বিষয়ের ওপর গবেষণা ক্রমশ স্তিমিত হয়ে আসে। তবে ডার্ক মেটার এবং এনার্জীর ওপর গবেষণা ষাটের দশক থেকে আবার সরব হয়ে ওঠে। তার দুটি কারণ হলো- প্রথমত এই সময় এই বিষয়ের ওপর কাজ করার জন্য বেশ কিছু নতুন প্রযুক্তি তৈরি হয়। দ্বিতীয়ত এর কিছুদিন আগেই বৈজ্ঞানিক বিশ্বতত্ত্ব (Scientific Cosmology) প্রাতিষ্ঠানিক স্বীকৃতি পায় এবং অনেক কণাপদার্থবিদ্যা বিজ্ঞানী, জ্যোতিপদার্থ বিজ্ঞানী ও বিশ্বতত্ত্ববিদরা এই বিষয়ের ওপর কাজ করার জন্য এগিয়ে আসেন। ষাট থেকে নব্বুই এর দশকের মধ্যে অনেকগুলি অত্যন্ত উঁচুদরের (Groundbreaking) গবেষণা প্রকাশিত হয় যেগুলির ওপর নির্ভর করেই মেটার এবং ডার্ক এনার্জীর ওপর গবেষণা বর্তমান পর্যায়ে পৌঁছেছে। এখানে কয়েকটি গুরুত্বপূর্ণ গবেষণার সিদ্ধান্তগুলি তুলে ধরা হলো:

১) Arrigo Finzi ১৯৬৩ সালে তাঁর "On the validity of Newton's law at a long distance" গবেষণাপত্রে বলেন নিউটনের মাধ্যাকর্ষণ সুত্রে বলা হয়েছে, কোনো বস্তুর মাধ্যাকর্ষণ ক্ষমতা দূরত্ব বাড়ার সাথে সাথে কমতে থাকে। তিনি এখানে, তাঁর গবেষনা পত্রে দেখান যে গ্যালাক্সি বা গ্যালাক্সিগুলির ক্লস্টারের বাইরের দিকে মাধ্যাকর্ষণ ক্ষমতা ভেতরের দিকের চেয়ে অনেক বেশি শক্তিশালী। তিনি সেই সময় পর্যন্ত ডার্ক মেটার "ব্যারিয়নিক উপাদান দ্বারা গঠিত" শিরোনামের সমস্ত গবেষণাপত্রগুলি প্রত্যাখ্যান করেন। এখানে তাঁর যুক্তি ছিল ডার্ক মেটার ব্যারিয়নিক উপাদান দ্বারা তৈরি হলে সেগুলি নিউটনের সুত্র অনুযায়ী গতিশীল হওয়ার কথা। তাহলে মহাকর্ষীয় বলের তারতম্য হতো না। এখানে তাঁর প্রস্তাব ছিল মেটার এবং ডার্ক এনার্জীর ওপর গবেষণা করার জন্য নিউটনের মাধ্যাকর্ষণ শক্তির নিয়মকে বদল করতে হবে। তৎকালীন বিজ্ঞানীরা তাঁর এই শক্তিশালী গবেষণাপত্রটির যথার্থ মূল্যায়ন করতে পারেন নি। "Despite the highly original and prescient nature of Finzi's work, it was largely ignored by the scientific community, …… the very bold nature of Finyi's conclusions may have been difficult for many of his colleagues to accept, or even seriously consider." (Bertone and Hopper, 2016)।

২) বিশ্বতত্ত্বে নিউট্রিনোর ভূমিকার ওপর প্রথম শক্তিশালী গবেষণাপত্রটি প্রকাশিত হয় ১৯৬৬ সালে। গবেষণাটি করেন Gershtein ও Zeldovich। ষাটের দশকে বিজ্ঞানী জালদোভিচ ছিলেন মাত্র কয়েকজন কণাপদার্থবিদের মধ্যে একজন, যিনি বৈজ্ঞানিক বিশ্বতত্ত্বকেও কণাপদার্থবিদ্যার প্রেক্ষাপট থেকে অনুসন্ধান করেছিলেন। মহাবিস্ফোরনের সামান্য পর, কী পরিমাণ নিউট্রিনো উৎপন্ন হয়েছিল, কত তাপমাত্রায় সেগুলি নিজেদের মধ্যে সংঘর্ষের মাধ্যমে ধ্বংস হয় এবং কি পরিমাণ নিউট্রিনো বেঁচে গিয়েছিল (Thermal Relic), তার ওপর তাঁরা অনুসন্ধান করেন। এখানে তাঁরা নিউট্রিনোর ভর নির্ণয় করেন এবং সেই তথ্য-উপাত্তের ভিত্তিতে মহাবিশ্বের সংকোচন ও প্রসারণের ওপর ভবিষ্যৎবাণী করেন। তাঁদের এই কাজটির মধ্যেই ছিল কালোবস্তু ও WIMPs উপাদানগুলির ওপর গবেষণার আদি বীজ। এর পরপরই সত্তুর এবং আশির দশকে এই নির্দেশনায় প্রচুর গবেষনা পত্র প্রকাশিত হয়। আশির দশকে বিজ্ঞানী জালদভিচ এবং তাঁর গবেষকদল প্রথম নিউট্রিনোকে ডার্ক মেটারের আদি উপাদান হিসেবে প্রস্তাব করেন (Bertone and Hopper, 2016)।

৩) সত্তুরের দশকের শুরুর দিকে আরেকটি যুগান্তকারী গবেষণা করেন বিজ্ঞানী Vera Robin, William Kent Ford, এবং Norbert Tonnard। তাঁরাই গ্যালাক্সিগুলির বৃত্তীয় গতি এবং শঙ্খিল (Spiral) গতির কার্ভগুলির তথ্য-উপাত্তের বিচার-বিশ্লেষণ করে মহাবিশ্বে বিশাল পরিমাণ মেটার এবং ডার্ক এনার্জীর শনাক্ত করণের নিমিত্তে পর্যবেক্ষণগত ভিত্তি গড়ে তোলেন। তাঁরা পর্যবেক্ষণগতভাবে প্রদর্শন করেন, শঙ্খিল গ্যালাক্সিগুলির কেন্দ্র থেকে একটা নির্দিষ্ট দূরত্বের পরও বৃত্তীয় গতি মোটামুটি একই থাকে বা বাড়তে থাকে (এর আগে পর্যন্ত বিজ্ঞানের সিদ্ধান্ত ছিল কোনো বস্তুর কেন্দ্র থেকে বস্তুর দূরত্ব যতই বাড়তে থাকে মহাকর্ষীয় আর্কষণ ততই দুর্বল হতে থাকে)। যেমন গ্যালাক্সিগুলির প্রান্তবর্তী এলাকাতেও কিছু কিছু তারা থাকে, যাদের গতি-বেগ কম-বেশি একই থাকে। এই পর্যবেক্ষণ থেকে তাঁরা এই সিদ্ধান্তে পৌঁছেন যে, গ্যালাক্সির ঐ নির্দিষ্ট এলাকার বাইরেও প্রচুর ডার্ক মেটার আছে এবং সম্ভবত তা গ্যালাক্সিটির চারিপার্শ্বে একটা উজ্জ্বল বলয় (Halo) সৃষ্টি করে (AMNH, 2000)।



চিত্র ৩: The rotation curve of a spiral galaxy (Messier 33), is depicted by yellow and blue points along with error bars. A predicted curve shows the distribution of visible matter, represented by the gray line. Data and model predictions originate from Corbelli and Salucci (2000). The difference between these curves suggests the presence of a dark matter halo surrounding the galaxy (Credit: Leo, 2018)।

৪) ১৯৭৪ সালে তিন ইস্তোনিয়ার বিজ্ঞানী Jaan Einasto, Ants Kaasik, এবং Enn Saar এর গবেষণাটি অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ। গবেষণাপত্রটির শিরোনাম ছিল "Dynamic evidence on massive coronas of galaxies" এখানে তাঁরা কোনো একটি গ্যালাক্সির সম্পূর্ণ ভর এবং তার ভেতরের তারাগুলির ভর পৃথক পৃথকভাবে নির্ণয় করেন। তাদের মধ্যে তুলনামূলক বিচার করলে দেখা যায় গ্যালাক্সির সামগ্রিক ভর পৃথক পৃথকভাবে নির্ণীত তারাগুলির ভরের সমস্টির চেয়ে অনেক বেশি। এই পার্থক্যকে তারা "Corona" বলে আখ্যায়িত করেন। আর এখান থেকেই ৎসুয়িকির "Missing mass" তত্ত্বের তাত্ত্বিক প্রমাণ পাওয়া যায় (Bertone and Hopper, 2016)।

৫) ঐ বছরই আরেকটি গবেষণাপত্র "The size and mass of galaxies, and mass of the universe" প্রকাশিত হয় এবং এর গবেষকত্রয় ছিলেন Jerry Ostriken, Jim Peebles, ও Amos Yahil। এখানে তারা অন্য দুটি গবেষণাপত্রের তথ্য-উপাত্ত গবেষণা করে উপর্যুক্ত গবেষণাটির মতো একই সিদ্ধান্তে পৌঁছেন যে, গ্যলাক্সির বাইরের দিকের অংশে ডার্ক এনার্জীর পরিমাণ অনেক বেশি এবং গ্যালাক্সির বাইরের দিকের অংশে বিশাল পরিমাণ ডার্ক মেটার আছে (Bertone and Hopper, 2016)।

৬) পরবর্তী গুরুত্বপূর্ণ গবেষণাপত্রটি ছিল বিজ্ঞানী Sandra Faber এবং John Gallagher কৃত। তাঁদের গবেষণাপত্রটির শিরোনাম ছিল "Masses and mass-to-light ratios of galaxies" এখানে তাঁদের সিদ্ধান্ত ছিল মহাবিশ্বের এই "অদৃশ্য ভর" অত্যন্ত শক্তিশালী এবং ক্রমশ আরো শক্তিশালী হচ্ছে। সুতরাং

এই মহাবিশ্ব জুড়ে বিশাল পরিমাণ ডার্ক মেটার ছড়িয়ে আছে। এই গবেষণাপত্রে তাঁরা 'Corona' এবং 'Halo' শব্দদ্বয়ের বদলে 'Massive envelope' ধারনাটি ব্যবহার করেন। তাঁদের এই সিদ্ধান্ত থেকেই বিশ্বতত্ত্ববিদ এবং জ্যোর্তিবিজ্ঞানীরা এই বিষয়টিকে গুরুত্বের সাথে গ্রহণ করেন এবং পরবর্তীতে কণাপদার্থবিদরাও এই বিষয়টির ওপর গবেষণা শুরু করে (Faber-Gallagher, 1978)।

৭) ১৯৭৭ সালের Peccei-Quin তত্ত্বটিও এই গবেষণার ক্রমধারায় খুবই গুরুত্বপুর্ন। যদিও তাঁরা গবেষনাটি করেছিলেন QCD এর Strong CP সমস্যার সমাধানের জন্য। এখানেই তাঁরা প্রাকল্পিক কণা একসিয়নকে ডার্ক মেটারের সম্ভাব্য আদি কণা হিসেবে প্রস্তাব করেন। এই প্রাকল্পিক কণাটিকে ঠান্ডা ডার্ক মেটারের আদি সম্ভাব্য প্রার্থী হিসেবে বৈজ্ঞানিক গবেষণায় অন্তর্ভূক্ত হয়। বিজ্ঞানী উইলচেক এই প্রাকল্পিক কণাটির একসিয়ন নামকরণ করেন (Wikipedia, 2023)।

৮) আশির দশকের মধ্যবর্তী সময়ে মেটার এবং ডার্ক এনার্জীর ওপর গবেষণার জন্য বিজ্ঞানীরা প্রথম Numerical Simulation পদ্ধতির প্রয়োগ শুরু করেন। এবং বৈজ্ঞানিক গবেষণার ক্ষেত্রে একটি নতুন দিগন্তের উন্মোচন হয়। এই পদ্ধতির মাধ্যমে প্রসারমান মহাবিশ্বের মহাকর্ষীয় শক্তির ক্ষেত্রে কী পরিমাণ ডার্ক মেটার থাকতে পারে, তার একটা গাণিতিক পরিমাপ সম্ভব এবং মহাবিশ্বের অবকাঠামোতে বিভিন্ন ধরনের প্রাকল্পিক ডার্ক মেটারের ভূমিকা ও অংশগ্রহণের একটা প্রাকল্পিক ব্যাখ্যা তৈরি করা যায়। এই Numerical Simulation পদ্ধতির মাধ্যমে ডার্ক মেটারের উপাদান-প্রার্থী কোনো নির্দিষ্ট কণার আদি চরিত্র-বৈশিষ্ট্যগুলি নির্ণয় করা যায়। যেমন- এগুলি মহাবিশ্বের পরিগঠনের সময় কি উত্তপ্ত ছিল, না ঠান্ডা চরিত্রের ছিল।

স্টান্ডার্ড মডেলে নিউট্রিনোগুলি অত্যন্ত হালকা Thermal relics - যেগুলি আদি মহাবিশ্ব থেকে তৈরি হয়েছিল এবং আপেক্ষিক গতি (Velocity) সম্পন্ন। সুতরাং এগুলিকে গরম ডার্ক মেটারের (Hot dark Matter) উদাহরণ হিসেবে উপস্থাপন করা যায়। Numerical simulation পদ্ধতিতে দেখা যায়, মহাবিষ্ফোরণের পরপরই (মহাবিষ্ফোরণের $১০^{-৩৬}$ সেকেন্ডে) মহাবিশ্ব একটা সময় পর্যন্ত প্রচন্ড দ্রুত গতিতে প্রসারিত হতে থাকে (Inflationary universe) এবং মহাবিশ্বের একটা বিশাল অবকাঠামো তৈরি হয়। পরবর্তিতে তাপমাত্রা ক্রমশ কমে যাওয়ার কারণে মহাবিশ্বের প্রসারণের গতির হার ক্রমশ কমতে থাকে। এখানে মহাবিশ্বের পরিগঠনের প্রক্রিয়াটি বৃহৎ থেকে ক্ষুদ্রের দিকে ("Top-down") ধাবিত। অন্যদিকে ঠান্ডা ডার্ক মেটার উপাদানগুলি মহাবিশ্বের পরিগঠনে বিপরীত প্রক্রিয়াটি ("Bottom-up") অনুসরণ করে।

প্রথম দিকের এই সিমুলেশনগুলি থেকে এটা বিজ্ঞানীরা ধারনা করতে থাকেন, ঠান্ডা এবং গরম ডার্ক মেটার দ্বারা মহাবিশ্বের সম্পূর্ণ ভিন্ন ধরনের অবকাঠামো তৈরি হয়। অবশ্য পররর্তীতে বিজ্ঞানীরা সিমুলেশনের পরীক্ষণের ফলাফলগুলির সাথে গ্যালাক্সিগুলির ওপর গবেষণার তথ্য-উপাত্তের মধ্যে বিচার বিশ্লেষণ করে দেখেন স্টান্ডার্ড মডেলের নিউট্রিনো অথবা অন্য যেকোনো গরম আদি কণাকে ডার্ক মেটারের শ্রেণিতে অন্তর্ভূক্ত করা যায় না।

১৯৮৩ সালে Simon White, Carlos Frenk এবং Marc Davis তাদের গবেষনা পত্রে বলেন "We find (the coherence length) to be too large to be consistent with the observed clustering scale of galaxies ……. The conventional neutrino- dominated picture appears to be ruled out." (Bertone and Hopper, 2016)

আশির দশকের আরো অনেকগুলি গবেষণাপত্রের প্রেক্ষাপটে বিজ্ঞানীরা সিদ্ধান্ত পৌঁছেন যে, নিউট্রিনো ডার্ক মেটারের আদি উপাদান হতে পারে না। স্ট্যান্ডার্ড মডেলের নিউট্রিনো ডার্ক মেটারের পরিগঠনে অনেক হালকা এবং গরম (Light & Hot)। কিন্তু কতিপয় বিজ্ঞানী ডার্ক মেটারের তালিকা থেকে নিউট্রিনোকে এখনো বাদ দেননি। কারণ নিউট্রিনোর আরো তিনটি ভেরিয়েশন আছে। তাছাড়া SUSY (SUperSYmetry) তত্ত্বের প্রাকল্পিক কণা স্টেরাইল নিউট্রিনোস, নিউট্রালিনোস এই তালিকায় অন্তর্ভূক্ত।

৯) ১৯৯৩ সালে Dodelson এবং Lawrence তাঁদের গবেষণাপত্রে এই প্রশ্নের উত্তর হিসেবে একটি খুব সহজ প্রকল্প প্রস্তাব করেন; তাহলো- হয়ত আরেকটি নিউট্রিনো শ্রেণি আছে, যেগুলি প্রচলিত নিউট্রিনোগুলির মতো দুর্বল বলের সাথে প্রতিক্রিয়া করে না, যা আমরা স্ট্যান্ডার্ড মডেলে দেখতে পাই। হতে পারে এই নিউট্রিনো শ্রেণিটি আদি মহাবিশ্বেই সৃষ্টি হয়েছিল। তাঁরা আরো বলেন এই অজানা নিউট্রিনো শ্রেণিটির স্পন্দন (Oscillation) থেকে হয়ত ডার্ক মেটারের উপাদান উৎপন্ন হয়। তবে সাম্প্রতিক কালে অধিকাংশ বিজ্ঞানীই স্বীকার করে নিয়েছেন যে, নিউট্রিনো ডার্ক মেটারের আদি উপাদান হতে পারে না (Bertone and Hopper, 2016)।

এখন পরবর্তী গবেষণাগুলির আলোচনার আগে কয়েকটি বিষয় সম্পর্কে এখানে একটা প্রাথমিক পরিচিতি জরুরি। এগুলি হলো-

- বিজ্ঞানীদের গবেষণার এলাকা
- গবেষণার মাধ্যম ও পদ্ধতি

MACHOs এবং WIMPs

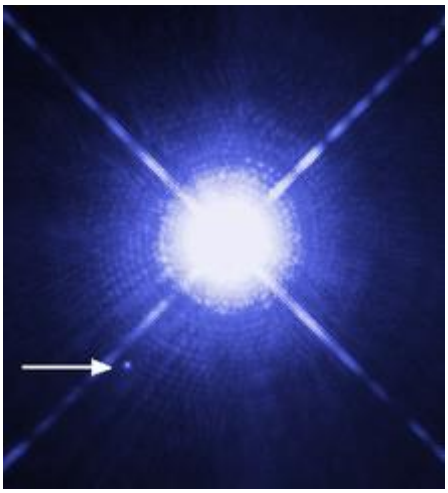
ডার্ক মেটারকে প্রত্যক্ষভাবে প্রমাণ করার নিমিত্তে বিজ্ঞানীরা এই মহাবিশ্বের বস্তুরাজিকে দুটি গ্রুপে ভাগ করে নিয়েছেন। তাহলো- বৃহতের জগতে MACHOs (Massive Compact Halo Object) এবং ক্ষুদ্রত্বের জগতে WIMPs (Weakly Interacting Massive Particle)। তাছাড়া, সাম্প্রতিক কালের বিজ্ঞানীরা আরো কিছু প্রকল্প প্রস্তাব করেছেন যেমন- SIMPs (Strong Interaction Massive Particles), Hidden Sektor প্রকল্প।

MACHOs: এই গ্রুপের বস্তুগুলি ছোটখাট তারা থেকে বিশাল কালোগহ্বরও হতে পারে। এগুলি আমাদের পরিচিত সাব এটমিক উপাদানগুলি দ্বারা তৈরি। যেমন- ইলেকট্রন, নিউট্রন, প্রোটন। MACHOs বস্তুগুলির আরো উদাহরণ হলো- নিউট্রন তারা, বিচ্ছিন্ন গ্রহগুলি বা Brown dwarf, White dwarf এবং খুবই ঝাপসা Red Dwarf। এগুলিকেও এই গ্রুপে অন্তর্ভূক্ত করার জন্য বিজ্ঞানীরা প্রস্তাব করেছেন। জ্যোর্তিপদার্থবিদ Kim Grist প্রথম এই MACHOs নামটি প্রস্তাব করেন ।

কালোগহ্বর বা নিউট্রন তারাগুলি কোনো বিশাল তারার সুপারনোভার ধ্বংসাবশেষ। গড়পরতায় নিউট্রন তারাগুলির ভর সূর্যের তুলনায় ১,৪ থেকে ৩ গুণ বেশি হতে পারে। সুপারনোভার অবশিষ্ট আরেকটি অংশ হলো এক ধরনের গ্যাসের মেঘ এবং এই উপাদানগুলি অবশ্যই বস্তুগত অবশিষ্ট অংশ হিসেবে মহাবিশ্বের কোথাও অদৃশ্য (Hidden) অবস্থায় রয়ে যায়। MACHOs খুব সামান্য আলো বিকিরণ করে বা একেবারেই বিকিরণ করে না, আন্তঃনাক্ষত্রিক স্পেসের মধ্যে গতিশীল, কোনো গ্রহ-নক্ষত্রের সাথে যুক্ত নয়। এগুলির মধ্যে যেহেতু কোনো ঔজ্জ্বল্য নেই, তাই এই ধরনের উপাদানগুলি শনাক্ত করা খুবই কঠিন। বিজ্ঞানীরা ধারনা করছেন এই ধরনের বৃহৎ মহাজাগতিক বস্তুগুলিতে ডার্ক মেটার থাকতে পারে (NASA, 2005)।

নিউট্রন তারাগুলি খুবই বিশাল আকৃতির হয় এবং এটির আশেপাশে যদি কোনো উজ্জ্বল মহাজাগতিক বস্তু না থাকে, তবে এগুলি অদৃশ্য (Dark) হয়ে উঠতে পারে। এগুলি যেহেতু সুপারনোভা থেকে তৈরি হয়, তাই এগুলি সাধারণ বস্তুর মতো নয়।

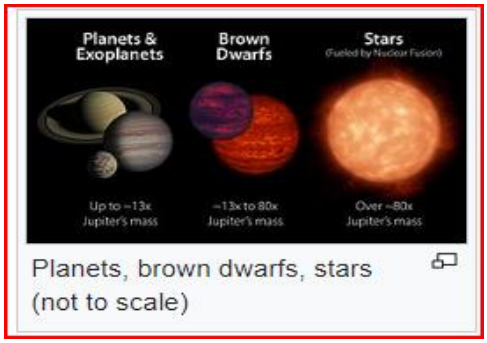
সাদা ডোআর্ফ (Dwarf) হলো কোনো নক্ষত্রের ধ্বংসাবশেষের কেন্দ্র, মূলত Electron-degenerate উপাদান দ্বারা গঠিত। এগুলি প্রচন্ড ঘন। এই ধরনের সূর্যের সমান ভরের কোনো একটি তারার আকার হবে পৃথিবীর সমান! এগুলি খুবই ক্ষীণপ্রভ এবং বিকিরিণের উৎস হলো থারমাল এনার্জীর (Thermal Energy) অবশিষ্টাংশ থেকে। সবচেয়ে কাছের সাদা ডোআর্ফ হলো Sirius B (চিত্র ৪), যেটি পৃথিবী থেকে ৮,৬ আলোক বর্ষ দূরে অবস্থিত। এটি Sirius A এর একটি বাইনারি (Binary) তারা, ১৯১০সালে আবিষ্কৃত হয় এবং এটির নামকরণ করেন বিজ্ঞানী Willem Luyten (Griest, 1993)।



চিত্র ৪: Binary star Sirius A and Sirius B (pointed by an arrow) (Credit: Wikipedia Commons, 2006)।

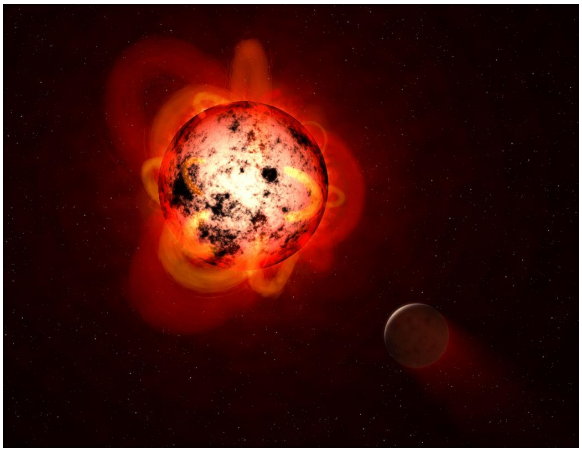
ব্রাউন ডোআর্ফ তারাগুলির ভর সাধারণত সূর্যের ভরের চেয়ে ৮% কম হয়। এই কারণে যথেষ্ট পরিমাণ ভরের অভাবে, সেখানে কোনো আণবিক বিক্রিয়া ঘটে না, তাই কোনো আলো বিকিরণও করে

না। আমাদের গ্যালাক্সির উজ্জ্বল পরিমন্ডলে অবস্থিত ব্রাউন তারাগুলিকে GL বা ML (MicroLensing) পদ্ধতিতে শনাক্ত করা হয়। আইনস্টাইন প্রথম মহাবিশ্বের এই নিয়মটির অস্তিত্বের ভবিষ্যৎবাণী করেন। এখন পর্যন্ত বিজ্ঞানীরা এই পদ্ধতিতে যে পরিমাণ ব্রাউন তারার সংখ্যা নির্ণয় করেছেন, তা ডার্ক মেটারের উপাদান হওয়ার জন্য যথেষ্ট হতে পারে না।



চিত্র ৫: Brown Dwarf (Credit: Wikipedia Commons, 2020)।

রেড ডোআর্ফ (Red Dwarf) হলো মহাকাশে সবচেয়ে ছোট (এগুলির ভর হলো সূর্যের ভরের মাত্র ৭.৫%) এবং ঠান্ডাতম (২০০০ kelvin) তারা। এই তারার সবচেয়ে পরিচিত উদাহরণ হলো সূর্যের সবচেয়ে নিকটবর্তী Proxima Centauri তারাটি। খুবই ক্ষীনপ্রভার কারনে এদেরকে শনাক্ত করা খুবই কঠিন, খালি চোখে দেখা প্রায় অসম্ভব। বিজ্ঞানীদের কেউ কেউ বলেন আমাদের ছায়াপথের একটা বিশাল অংশ এবং Magellanic মেঘে এই ধরনের প্রচুর অদৃশ্য তারা রয়েছে (Wikipedia, 2024)।



চিত্র ৬: Flaring Red Dwarf Star (Credit: NASA, 2017)।

MACHOs গুলি যখন কোনো উজ্জ্বল মহাজাগতিক বস্তুর পাশ দিয়ে অতিক্রম করে, তখন উজ্জ্বল বস্তুগুলির কারণে অনালোকিত MACHOs গুলি খুব অল্প সময়ের জন্য উজ্জ্বল বা উজ্জ্বলতর হয়ে ওঠে।

অথবা তার উল্টোটিও ঘটে পারে, এটিকে বলা হয় Gravitational microlensing (ML)। এটি মহাবিশ্বের MACHOs বস্তুগুলিকে শনাক্ত করার আরেকটি পদ্ধতি। তবে MACHOs এর গতি-প্রকৃতি নিয়ে বিজ্ঞানীদের মধ্য মতভেদ আছে। একদল বিজ্ঞানী বলেন MACHOs এর তথ্য-উপাত্ত থেকে ডার্ক মেটারের অস্তিত্বকে নির্ণয় করা যায় না। আবার আরেক দল বিজ্ঞানীরা ২০০০ সালে (MACHO Collaboration) বলেছেন, এই মহাবিশ্বে মাইক্রোলেন্সিং এর মাধ্যমে প্রচুর মহাজাগতিক বস্তুর সন্ধান পাওয়া গেছে এবং সেখানে প্রায় ২০% ডার্ক মেটার থাকতে পারে (Alcock et al., 2000)।

EROS2 প্রকল্পের আর এক দল বিজ্ঞানী Red dwarf এবং White dwarf কে এই গ্রুপে সংযোজনের প্রস্তাব প্রত্যাখ্যান করেছেন। তাঁরা সেখানে যথেষ্ট পরিমাণে মাইক্রোলেন্সিং শিফট (Shift) খুঁজে পাননি। সেখানে তারা উজ্জ্বল পরিমন্ডলগুলিতে (Halo) এই বস্তুদ্বয়ের ১% ভাগেরও কম ভর শনাক্ত করতে পেরেছেন, যেগুলি Red dwarf থেকে প্রসূত।

WIMPs: বিজ্ঞানীরা কিছু অনাবিষ্কৃত প্রাকল্পিক সাব এটমিক কণাকে ডার্ক মেটারের আদি উপাদান হিসেবে প্রস্তাব করেছেন, এই গ্রুপটিকেই বলা হয় WIMPs। WIMPs এর কোনো সুনির্দিষ্ট বৈজ্ঞানিক ব্যাখ্যা এখনো বিজ্ঞানীরা প্রণয়ন করেননি। তাই সাধারণভাবে বলা যায়, এগুলি কতগুলি নতুন ধরনের প্রাকল্পিক আদি কণা, যেগুলি শুধু মহাকর্ষীয় বলের সাথে ক্রিয়া-প্রতিক্রিয়া করে; প্রকৃতির মৌলিক বলগুলির সাথে কোনো ধরনের ক্রিয়া-প্রতিক্রিয়া করে না (কিছু ব্যতিক্রম ছাড়া, যেমন নিউট্রিনো কণা দুর্বল বলের সাথে খুবই ক্ষীণ একটা বিক্রিয়া করে)। এগুলি স্ট্যান্ডার্ড মডেলের কোনো অংশ নয়, এবং দুর্বল বলের চেয়ে অনেক বেশি দুর্বলতর, কিন্তু অকল্পনীয় ক্ষুদ্রশক্তি সম্পন্ন।

এগুলি আমাদের পরিচিত ব্যরিয়নিক উপাদান দ্বারা তৈরি নয়। এগুলিকে "Weakly Interacting" বলা হয়, কারণ এগুলি কোনো রকম ক্রিয়া-প্রতিক্রিয়া ছাড়াই যেকোনো সাধারণ উপাদানের ভেতর দিয়ে চলাচল করতে পারে। এগুলিকে "massive" বলা হয়, কারণ এই ধরনের কিছু প্রাকল্পিক কণার ভর ব্যরিয়নিক কণার চেয়ে অনেক বেশি হতে পারে। যেমন নিউট্রালিনু একটি প্রোটনের চেয়ে ৩০ থেকে ৫০০০ হাজার গুণ বেশি ভারি হতে পারে। আর SUSY তত্ত্বের তড়িত নিরপেক্ষ কণাগুলির মধ্যে এটি হলো হালকাতম! এখন পর্যন্ত বৈজ্ঞানিক গবেষণার প্রেক্ষাপটে বিজ্ঞানীরা মনে করছেন, স্টেরাইল নিউট্রিনো, একসিয়ন এবং নিউট্রালিনু কণাগুলি, সবচেয়ে সম্ভাবনাময়, ডার্ক মেটারের আদি উপাদান হওয়ার (NASA, 2005)।

নিউট্রিনো আবিষ্কারের শুরুর দিকে বিজ্ঞানীদের ধারনা ছিল নিউট্রিনো কণা ভরশূন্য। ১৯৯৮ সালে বিজ্ঞানীরা আবিষ্কার করেন যে, নিউট্রিনোর খুব হালকা একটা ভর আছে। তাই অনেক বিজ্ঞানী মনে করেন এই অতি ক্ষুদ্র ভরের কারণে এগুলির ডার্ক মেটারের আদি উপাদানের সম্ভাব্য প্রার্থী হওয়ার সম্ভাবনা খুবই কম (Rajasekaran, 2016)।

একসিয়ন কণাকে প্রস্তাব করা হয় কোনো একটি নিউট্রনের "Electrical dipole" এর অনুপস্থিতিকে প্রমাণ করার জন্য। আর এই প্রক্রিয়ার ফলাফল কণাপদার্থবিদ্যা এবং জ্যোর্তিবিদ্যার জন্য খুব প্রয়োজনীয় একটি বিষয়। বিজ্ঞানীরা বলেন, একসিয়নেরও যথেষ্ট ভর নেই ডার্ক মেটারের সম্ভাব্য

প্রার্থী হওয়ার। আবার অনেক বিজ্ঞানী বলেন সম্ভবত বিগব্যাং থেকে প্রচুর পরিমাণে একসিয়ন কণা উৎপাদিত হয়েছিল। বর্তমানে একসিয়ন এর অস্তিত্বকে ল্যাব ছাড়া গ্যালাক্সির হ্যালো (Halo) এবং সূর্যের অভ্যন্তরেও সন্ধান করা হচ্ছে।

আর SUSY তত্ত্ব থেকে বিজ্ঞানীরা নিউট্রালিনুকে ডার্ক মেটারের আরেকটি সম্ভাব্য প্রার্থী হিসেবে চিন্তা করছেন। নিউট্রিলিনু সাব এটমিক জগতের আপেক্ষিকতায় একটি অত্যন্ত ভারি কণা। বিজ্ঞানীরা ভূগর্ভের ল্যাব এবং মহাবিশ্ব- দুই পরিসরেই এই কণাটির সন্ধান করছেন।

এই প্রকল্পে বলা হয়েছে, আদি মহাবিশ্বে স্ট্যান্ডার্ড মডেলের আদি কণাগুলির মতো এই ধরনের অনেক আদিকণা উৎপন্ন হয়েছিল (Thermal relics) এবং এগুলিই হলো ঠান্ডা ডার্ক মেটার (CDM, Cold Dark Matter)। ডার্ক মেটারগুলিকে পরীক্ষামূলকভাবে শনাক্ত করার জন্য আদি কণাগুলির মধ্যে সংঘর্ষগত কারণে যে তারা বিলীন (Anniliation) হয়ে যায় সেখানেও তারা অনুসন্ধান করেন। তাছাড়া গামা রে, নিউট্রিনো এবং নিকটবর্তী গ্যালাক্সি বা গ্যালাক্সিপুঞ্জের মহাজাগতিক রশ্মি (Cosmic Ray) গুলিকেও এই গ্রুপে অন্তর্ভূক্ত করেন। এই কণাগুলিকে শনাক্ত করার জন্য WIMPs কণাগুলিকে কোনো কেন্দ্রীনের (Nuclei) সাথে সংঘর্ষ ঘটানো হয়; আবার ত্বরণ যন্ত্রগুলির (Colliders) মাধ্যমেও WIMPs কণাগুলিকে শনাক্ত করার চেষ্টা করা হচ্ছে।

WIMPs গ্রুপের প্রাকল্পিক কণাগুলিকে বিজ্ঞানীরা আবার তিন ভাগে ভাগ করেছেন। যথা- উত্তপ্ত ডার্ক মেটার (Hot Dark Matter, HDM), গরম ডার্ক মেটার (Warm Dark Matter, WDM) এবং ঠান্ডা ডার্ক মেটার (Cold Dark Matter, CDM)।

উত্তপ্ত ডার্ক মেটার (HDM): এই প্রকল্পে বিজ্ঞানীরা তাপমাত্রার কোন সুনির্দিষ্ট তাপমাত্রাগত সিমানাকে প্রস্তাব করেননি। এখানে তারা ঐ ধরনের অতি ক্ষুদ্র এবং অকল্পনীয় স্বল্প ভরযুক্ত কণাগুলিকে প্রস্তাব করেছেন, যেগুলির গতি প্রায় আলোর গতির কাছাকাছি। স্ট্যান্ডার্ড মডেলের তিন ধরনের নিউট্রিনো কণাগুলি হলো এই গ্রুপের শক্তিশালী প্রার্থী। এই উপাদানগুলির অস্তিত্ব পরীক্ষামূলকভাবে প্রমাণিত; এগুলি তড়িত-চুম্বকীয় ক্ষেত্রের সাথে অত্যন্ত দুর্বলভাবে কাজ করে। বর্তমানে বিজ্ঞানীরা নির্ণয় করেছেন, একটি নিউট্রিনোর ভর হলো একটি প্রোটনের এক বিলিয়ন ভাগের একভাগ, অর্থ্যাৎ 10^{-34}। যদিও নিউট্রিনোর ভর অতি সামান্য, নিউট্রিনোর শক্তি ঘনত্ব সমস্ত মহাবিশ্বে আলোর উপাদানের শক্তি ঘনত্বের ০.০৫% (Luminet, 2020)।

গরম ডার্ক মেটার (WDM) : এই প্রকল্পে আরেকটি আদি প্রাকল্পিক উপাদান ডার্ক মেটারের আদি উপাদান হতে পারে বলে বিজ্ঞানীরা মনে করছেন। তাহলো স্টেরাইল নিউট্রিনো (Strile Neutrino)। স্টেরাইল নিউট্রিনো সাধারণ নিউট্রিনোগুলির মতো দুর্বল বল, সবল বল বা তড়িত-চুম্বকীয় ক্ষেত্রের সাথে কোনো ক্রিয়া-প্রতিক্রিয়া করে না, তাই এদেরকে শনাক্ত করা অত্যন্ত কঠিন। কিন্তু এই কণাগুলির যেহেতু ভর আছে সেহেতু মহাকর্ষীয় শক্তির সাথে ক্রিয়া-প্রতিক্রিয়া করে।

এই প্রাকল্পিক কণাটি নিয়ে প্রথম গবেষণা করেন প্রখ্যাত ইতালীয়ান বিজ্ঞানী এটোরে মাজোরানা (Ettore Majorana)।

স্টেরাইল নিউট্রিনোগুলির উদ্ভব হয় সাধারণ নিউট্রিনোগুলির বৃত্তীয় ও রৈখিক গতি (Helicity) তে অনিয়ম (Anomaly) জনিত কারণে। স্ট্যান্ডার্ড মডেলের সাব এটমিক উপাদানগুলির একটি গতিশীল অবস্থা থাকে, এটাকেই চক্রন বলা হয়। কোনো একটি উপাদানের বৃত্তীয় ও রৈখিক গতি বাম অথবা ডান দিকে হতে পারে, যা নির্ভর করে ঘূর্ণন দিক-নির্দেশনার ওপর। যদিও স্ট্যান্ডার্ড মডেলের লেপটন বা কোয়ার্ক কণাগুলি ডান দিকে বা বাম দিকে অর্থাৎ উভয় দিকেই ঘুরতে পারে, কিন্তু নিউট্রিনোর ক্ষেত্রে এখন পর্যন্ত ডান দিক নির্দেশনায় ঘূর্ণনকে পর্যবেক্ষণ করা যায়নি। Minimal Supersymetry Standard Model (MSSM) এ ভুলভাবে ভবিষ্যৎবাণী করা হয়েছিল যে, সাধারণ নিউট্রিনোগুলির "শূন্য-স্থির-ভর" (Zero rest mass) আছে। কিন্তু ১৯৯৮ সালে নিউট্রিনোর স্পন্দন (Oscillation) চরিত্র আবিষ্কার হওয়ার পর বিজ্ঞানীরা বাধ্য হন নিউট্রিনোতে ভর আরোপ করতে । স্টেরাইল নিউট্রিনোগুলিকেও এই ধরনের ভর ও কম্পন যুক্ত বলে বিজ্ঞানীরা প্রস্তাব করেন, যদি স্টেরাইল নিউট্রিনোগুলির ভর $<2.14*10^{-37}$kg –এর চেয়ে কম হয়, তবে এই কণাগুলি ডার্ক মেটারের আদি উপাদান হওয়ার উজ্জ্বল সম্ভাবনা আছে বলে বিজ্ঞানীরা ধারনা করেন (Luminet, 2020)।

অনেকগুলি পরীক্ষণের মাধ্যমে স্টেরাইল নিউট্রিনোকে শনাক্ত করার প্রয়াস চালানো হয়েছে, কিন্তু তাদের সবগুলি ফলাফল পরস্পর বিরোধী। যেমন ২০১৬ সালে গবেষকরা Ice Cube Neutrino Observatory তে স্টেরাইল নিউট্রিনোকে শনাক্ত করার একটি প্রয়াস চালান। কিন্তু সেখানে তাঁরা স্টেরাইল নিউট্রিনোর সন্ধান পাননি। স্টেরাইল নিউট্রিনো হলো একটি প্রাকল্পিক সাব এটমিক কণা যেটি একমাত্র মহাকর্ষীয় বল ছাড়া অন্য কোনো কিছুর সাথে ক্রিয়া-প্রতিক্রিয়া করে না এবং ডার্ক মেটারের আদি উপাদানের অন্যতম সম্ভাবনাময় প্রার্থী। তার দুই বছর পর বিজ্ঞানীরা Mini Boo Ne Collaboration পরিক্ষণে, নিউট্রিনোর ইস্পিত পরিমাণের চেয়ে অনেক বেশি পরিমাণ স্পন্দনের সন্ধান পান। স্টেরাইল নিউট্রিনোকে শনাক্ত করার এটি একটি আশাপ্রদ ইঙ্গিত।

ঠান্ডা কালোবস্তু (Cold Dark Matter, CDM): এই ধরনের আদি উপাদানগুলি HDM ও WDM কণাগুলির তুলনায় বড় এবং স্লথ গতি সম্পন্ন হয়। এই ধরনের অপরিচিত (Exotic) উপাদানগুলি উচ্চশক্তি পদার্থ বিদ্যায় (High energy physics) উৎপাদন করা সম্ভব হবে বলে বিজ্ঞানীরা মনে করেন, যা স্ট্যান্ডার্ড মডেলের বাইরের বিষয়। এই ধরনের দুটি সম্ভাব্য উপাদান হলো এক্সিয়ন (Axions) এবং নিওট্রালিনোস (Neutralinos)। এক্সিয়ন প্রাকল্পিক কণাটির ক্ষেত্রে বিজ্ঞানীরা ধারনা করেন এগুলি স্থায়ী (stable), তড়িত নিরপেক্ষ (electrically neutral) এবং অকল্পনীয় হালকা; তাদের ভর $১০^{-৩৯}$ কেজি থেকে $১০^{-৩৬}$ কেজি এর মধ্যে বলে বিজ্ঞানীরা ধারনা করেন। এই নির্দেশনায় CAST (CERN Axion Solar Telescope) এবং ADMX (The Axion Dark Matter eXperiment) নামে দুটি প্রজেক্টে এক্সিয়ন কণাকে শনাক্ত করার প্রয়াস চালানো হয়, কিন্তু তা ব্যর্থ হয়।

অন্যদিকে সুপার সিমেট্রি তত্ত্ব নিউট্রালিনো (Neutralino) প্রাকল্পিক কণাকে ডার্ক মেটারের আদি উপাদান হিসেবে প্রস্তাব করেছে। CAST তত্ত্বে প্রতিটি আদি কণার একটি বিপরীত কণার অস্তিত্বের কথা ভবিষ্যৎবাণী করা হয়েছে, এগুলিকে বলে সুপার পার্টনার (Sparticles)। এগুলি তাদের পার্টনারের চেয়ে

ভারি হয়। SUSY তত্ত্ব থেকে ডার্ক মেটারের আদি উপাদান হিসেবে নিউট্রালিনোকেও হয়ত শনাক্ত করা যাবে, যেগুলি নন-ব্যরিয়ন ডার্ক মেটারের উপাদান হতে পারে। তড়িত নিরপেক্ষ কণা ফোটিনো (Photino) (ফোটনের সুপার পার্টনার), Zino (Zo boson) এবং Higgsine (Higgs Boson) কণার সমন্বয়ে নিউট্রালিনো অত্যন্ত উচ্চ তাপমাত্রায় উৎপন্ন হয় এবং বিগব্যাং এর সময় প্রচুর নিউট্রিনো উৎপাদিত হয়েছিল।

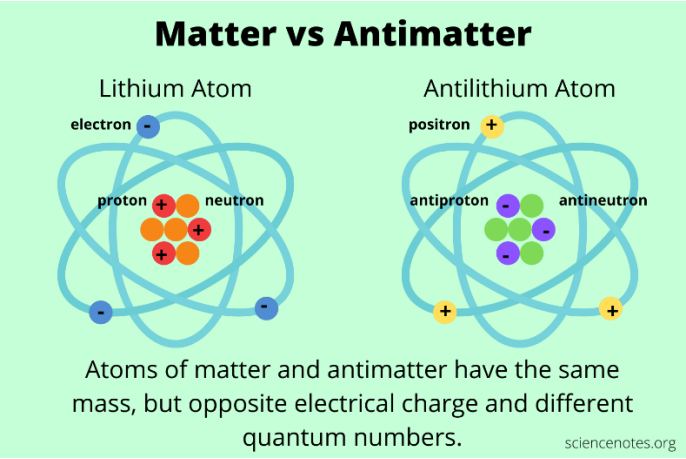
এই প্রকল্প অনুসারে এই প্রাকল্পিক কণাগুলি যেহেতু স্থায়ী, সেহেতু মহাবিশ্বে এগুলি প্রচুর পরিমাণে থাকার কথা, যেগুলির ভর প্রোটনের চেয়ে একশ গুণ বেশি ($১০^{-২২}$ গ্রাম) হতে পারে। তাই এই তত্ত্বের প্রবক্তারা নিউট্রালিনোকে ডার্ক মেটারের আদি উপাদান হওয়ার উজ্জ্বল সম্ভাবনা হিসেবে দেখেন।

কনাপদার্থবিদ্যার প্রেক্ষাপটে স্ট্যান্ডার্ড মডেলে যে সুপারসিমেট্রি প্রক্রিয়ায় গবেষণা করা হয়, তাকেও WIMPs কণা শনাক্ত করণে ব্যবহার করা হয়। এই প্রক্রিয়া থেকে WIMPs কণার চরিত্র-বৈশিষ্ট্যসম্পন্ন নতুন কণা উৎপন্ন হতে পারে বলে অনেক বিজ্ঞানী ধারনা করেন। এই সম্ভাবনাকে বিজ্ঞানের ভাষায় বলা হয় "WIMPs miracle"। এখান থেকে প্রসূত কোনো সুপার সিমেট্রিক সুপার পার্টনার কণা যদি স্থায়ী (Stable) হয় তবে তাও ডার্ক মেটারের আদি কণা হতে পারে (Jangman et al., 1995)।

অনেক বিজ্ঞানী বলছেন নিউট্রিনোর সুপার-পার্টনার Neutralino সবচেয়ে সম্বভবনাময় ডার্ক মেটারের আদি উপাদান। ২০১৩ সালের এক গবেষণা পত্রে বলা হয়েছে, LHC এর মাধ্যমে সুপার সিমেট্রিকে শনাক্ত করনের প্রয়াস ব্যর্থ হয়েছে; তাই অনেক বিজ্ঞানী WIMPs গ্রুপ থেকে ডার্ক মেটারের আদি কণা আবিষ্কারে সন্দিহান হয়ে পড়েছেন (Craig, 2014)।

অ্যান্টি ম্যাটার সাব এটমিক উপাদানগুলিকেও বিজ্ঞানীরা WIMPs এর অনুসন্ধানের গ্রুপে অন্তর্ভূক্ত করেছেন।

প্রতিবস্তু (Antimatter): WIMPs কণাগুলিকে শনাক্ত করার আরেকটি পরোক্ষ প্রাকল্পিক প্রস্তাব হলো প্রতিবস্তু। এই তত্ত্বে বলা হয় প্রতিটি বস্তুর একটি প্রতিবস্তু আছে, যেগুলির ভর একই কিন্তু বিপরীতধর্মী বা বিকর্ষণধর্মী। যেমন ইলেকট্রনের প্রতিবস্তু পজিট্রন, কোয়ার্ক-অ্যান্টিকোয়ার্ক, প্রোটন-অ্যান্টিপ্রোটন। প্রতিবস্তুগুলি এই অ্যান্টি উপাদানগুলি দ্বারা গঠিত। যখন কোনো বস্তু তার প্রতিবস্তুর সাথে ক্রিয়া-প্রতিক্রিয়া করে তখন তারা ধ্বংস (annihilate) হয়ে যায় এবং বিকিরণমূলক শক্তিতে পরিণত হয়। যখন বস্তু শক্তি থেকে উৎপন্ন হয় (যেমন- কণা-ত্বরণ যন্ত্রগুলিতে) তখন উপাদানগুলি বস্তু-জোড়া (particles pairs) এবং প্রতিবস্তু-জোড়াতে সমান পরিমাণে বিতরিত হয়। ১৯৯৬ সালে প্রথম CERN এর ত্বরণ-যন্ত্রে অ্যান্টি হাইড্রোজেন অণু তৈরি করা হয়। সাম্প্রতিক কালে CERN এর আলফা প্রজেক্টে বিজ্ঞানীরা (Alfa Collaboration) এক হাজার অ্যান্টি হাইড্রোজেন অণু তৈরি করতে সক্ষম হন এবং চুম্বক ক্ষেত্র (Magnetic Trap) তৈরি করে তাতে ঐ অ্যান্টি হাইড্রোজেন অণুগুলিকে কয়েক ঘণ্টা ধরে রাখতে ও সক্ষম হন (Baker et al., 2023)।



চিত্র ৭: Matter and antimatter atoms possess identical mass, yet their protons and electrons carry opposite charges (Credit: Helmenstine, 2024)।

যেহেতু উপর্যুক্ত কোনো মডেলই এই সমস্যার সমাধান দিতে পারছে না, সেহেতু বেশ কয়েকজন বিজ্ঞানী প্রতিবস্তুতে বিকর্ষণধর্মী মহাকর্ষীয় বলের আরোপ করার প্রকল্প প্রস্তাব করেছেন। তবে অধিকাংশ বিজ্ঞানীই মনে করেন এই প্রকল্প সঠিক হওয়ার সম্ভাবনা খুবই কম। এই প্রকল্পকে পরীক্ষা করে দেখা তুলনামূলকভাবে সহজতর। যেমন CERN এর আলফা প্রজেক্টের মধ্যে প্রতি-অণু তৈরি করে তাকে মহাকর্ষীয় ক্ষেত্রে স্থাপন করলেই আমরা তার প্রমাণ পেয়ে যাব। আর যদি এই প্রকল্পের প্রস্তাব সঠিক বলে প্রমাণিত হয় তবে স্ট্যান্ডার্ড মডেল ভুল বলে প্রমাণিত হবে এবং বিজ্ঞানের ক্ষেত্রে ঘটে যাবে এক মহা বিপ্লব। লেখক এখানে বলেছেন, ঐ পরীক্ষায় সম্ভবত প্রমাণিত হবে ডার্ক মেটার এবং প্রতিবস্তুর ঘনত্বের ক্ষেত্রে প্রতিবস্তুর আদৌ কোনো ভূমিকা নেই (Luminet, 2020)।

SIMPs: ২০১৭ সালে ডার্ক মেটারের আদি উপাদানের ওপর একটি ব্যতিক্রমধর্মী গবেষণাপত্র প্রকাশিত হয়। এখানে বলা হয়েছে MACHOs প্রকল্প বর্তমানে মৃত, WIMPs প্রকল্প সম্ভাবনাহীন এবং এই প্রেক্ষাপটে বিজ্ঞানীরা ডার্ক মেটারের আদি উপাদানকে অনুসন্ধান করার আরেকটি প্লাটফর্ম প্রস্তাব করেছেন, তাহলো SIMPs (Strong Interacting Massive Particles) ।

আর SIMPs প্রকল্পে প্রস্তাব করা হয়েছে, এই কণাগুলি নিজেদের মধ্যে সবলভাবে বিক্রিয়া করে এবং সাধারণ কণাগুলির সাথে অত্যন্ত ক্ষীণভাবে বিক্রিয়া করে। এখানে বিজ্ঞানী মুরায়ামা (Murayama) SIMPs কণাগুলিকে কোয়ার্কগুলির একত্রিত হওয়ার প্রক্রিয়া থেকে তাদের অস্তিত্ব অনুমান করেছেন। স্ট্যান্ডার্ড মডেলের আদি কণাগুলি, যেমন নিউট্রন বা প্রোটন তৈরি হয় নির্দিষ্ট সংখ্যক কোয়ার্কের সমন্বয়ে। অন্যদিকে SIMPs কণাগুলি পায়ন (Pion) কণার মতো একটি কোয়ার্ক এবং একটি অ্যান্টি কোয়ার্কের সমন্বয়ে দুটি কোয়ার্ক দ্বারা গঠিত। এখানে এই কণাগুলির সংখ্যা পরিমাণে বেশি উৎপাদিত হয়; তা থেকে বিজ্ঞানী মুরায়ামা বলেন, যদিও এগুলি খুব দুর্বলভাবে সাধারণ উপাদানের সাথে আন্তঃক্রিয়া করে, তাই এটা খুবই স্বাভাবিক এগুলি ব্যারিয়ন কণার মত একত্রিত (Merging) বা ক্ষয় (Decaying) না হয়ে

মহাবিশ্বে ছড়িয়ে পড়ে। কিন্তু সাধারণ বস্তুতে তাদের একটা নিশানা (Fingerprint) থেকে যাওয়াটা যৌক্তিক (Sanders, 2017)।

থারমাল রেলিক্স (Thermal Relics): বিজ্ঞানীরা বলেন আদি মহাবিশ্ব, বিগব্যাং এর পর যখন ক্রমশ ঠান্ডা হচ্ছিল তখন এক পর্যায়ে আদি ক্ষুদ্র কণাগুলির উদ্ভব হতে থাকে। এগুলিকে বলা হয় তপ্ত-অবশিষ্টাংশ (Thermal Relics)। এই ঠান্ডা হওয়ার একটা বিশেষ সময়গত পর্যায়ে কিছু তাপ-নিরপেক্ষ আদি কণার উদ্ভব হয়েছিল। এই সময়গত মুহূর্তটিকে বিজ্ঞানের ভাষায় বলা হয় "Phase Transition"।

এই তপ্ত ও তাপ-নিরপেক্ষ উদ্ভূত কণাগুলির মধ্যে মূল পার্থক্যগুলি হলো, এগুলির উৎপাদনের পরিমাণ ও ভরের মধ্যে পার্থক্য ছিল এবং জোড়াবদ্ধতাও (Coupling) ভিন্ন প্রকৃতির ছিল। এই পার্থক্যগুলি ডার্ক মেটারকে শনাক্ত করার জন্য খুবই গুরুত্বপূর্ণ। যেমন- WIMPs কণাগুলি তাপশক্তি থেকে উদ্ভূত। কিন্তু বিজ্ঞানীরা ধারনা করেন ডার্ক মেটারের অন্যতম আদি উপাদান প্রার্থী একসিয়ন কণাগুলি তাপ-নিরপেক্ষ (Non-Thermal) প্রক্রিয়া থেকে উদ্ভূত হয়েছিল।

বিজ্ঞানীরা বলেন, আদিম মহাবিশ্বের ঐ অতি উচ্চ তাপমাত্রায় যখন আদি উপাদানগুলি তৈরি হচ্ছিল, তখন তারা একটা সাম্য অবস্থায় (Equilibrium) ছিল এবং উৎপাদিত আদি উপাদানগুলির ঘনত্ব এবং ফোটনের ঘনত্ব প্রায় একই পরিমাণ ছিল। সেই সময়টায় মহাবিশ্ব যখন ক্রমশ ঠান্ডা হচ্ছিল, তখন সেখানে WIMPs এর পরিমাণ এবং ফোটনের সংখ্যায় আনুপাতিক হারে পরিবর্তন হচ্ছিল। অর্থ্যাৎ তাপমাত্রা ক্রমশ হ্রাস পাওয়ার কারণে আদি কণাগুলি থেকে ফোটন নির্গত হচ্ছিল এবং এই কারণে WIMPs এর পরিমাণ ক্রমশ কমতে থাকে এবং ফোটনের সংখ্যা ক্রমশ বাড়তে থাকে এবং WIMPs কণাগুলি তাদের তাপমাত্রার ক্রান্তিবিন্দুতে (Critical Point) পৌঁছানো পর্যন্ত এই প্রক্রিয়াটি চলতে থাকে (ফোটন নির্গমনের কারণে তাদের তাপমাত্রা কমছিল)। WIMPs কণাগুলির তাপমাত্রা যখন ক্রান্তি বিন্দুর নিচে চলে আসে, তখন তারা ক্রমশ কেন্দ্র থেকে দূরে সরে যেতে থাকে এবং প্রসারণের বর্হিদেশে অবস্থান নেয় এবং WIMPs কণাগুলির ঘনত্ব চক্রবৃদ্ধি (Exponentially) হারে কমতে থাকে। কারণ তাদের নিজেদের মধ্যে সংঘর্ষের কারণে তাদের ধ্বংসায়ন (Annihilation) হতে থাকবে এবং তাদের সংখ্যা কমতে থাকবে।

যদি শুরুতে প্রতিষ্ঠিত ঐ সাম্য অবস্থা এখন পর্যন্ত থেকে থাকে, তবে তাদের ঘনত্ব অনেক কমে যাওয়ার কথা। তাপমাত্রা হ্রাসের এই প্রক্রিয়ায় একটি বিশেষ সময়ক্ষণে তাপমাত্রা এত নিচে নেমে যাওয়ার কথা যে তখন একটি WIMPs এর পক্ষে আরেকটি WIMPs খুঁজে পাওয়া অসম্ভব হয়ে উঠবে। সুতরাং তাদের ধ্বংসায়ন বন্ধ হয়ে যাবে। এ সময় অবশিষ্ট WIMPs কণাগুলি স্থায়ী হয়ে যাবে। এখানে প্রসংগক্রমে উল্লেখ করে রাখা জরুরি যে যদি কোন একটি WIMPs কণা স্থায়ী (Stable) হয়, সেটা ডার্ক মেটারের আদি উপাদান হতে পারে।

এই অবস্থায় ঐ সময়কার কিছু WIMPs কণার তাপজনিত স্বল্পতার কারণে জমাট বেঁধে (Freeze-out) যাওয়ার কথা এবং সেগুলির একটা উল্লেখযোগ্য পরিমাণ এখনো মহাবিশ্বে অস্তিত্বশীল থাকার কথা। বোলৎম্যানের সমিকরণের মাধ্যমে তা সঠিকভাবে ভবিষ্যৎবাণী করা যায়। এগুলিই হলো প্রাকল্পিক WIMPs কণা।

সাব এটমিক জগতে, স্ট্যান্ডার্ড মডেলের বেশ কিছু সমস্যা কণা পদার্থবিদ্যার দুর্বল তড়িৎ-চুম্বকীয় বলতত্ত্বের মাধ্যমে সমাধান করা হয়েছে, যা সুপারসিমেট্রি তত্ত্বের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য। সুতরাং বিজ্ঞানীরা অনুমান করেন, WIMPs কণার দ্বারা ডার্ক মেটারের আদি উপাদান তৈরি হয়ে থাকতে পারে। কারণ যেকোনো আদি কণার যখন ধ্বংশায়ন ঘটে তখন সেখান থেকে ডার্ক মেটারের আদি উপাদানকে শনাক্ত করার উজ্জ্বল সম্ভবনা রয়েছে। এখানে বিজ্ঞানীদের যুক্তি হলো যদি ডার্ক মেটারের আদি উপাদান তাপজনিত উৎস থেকে উদ্ভূত হয়ে থাকে তবে, সেগুলির দুর্বল বলের সাথে ক্রিয়া-প্রতিক্রিয়া করা যৌক্তিক। এবং এই অবস্থা থেকেই বিজ্ঞানীরা আশা করছেন একসময় LEP, CERN বা ফার্মি ল্যাবের CDF ত্বরণযন্ত্রের মাধ্যমে তা প্রমাণ করা সম্ভব হবে (Griest, 1996)।

হিডেন সেক্টর প্রকল্প (Hidden Sector Project): ২০০৬ সালের ঐ গবেষণা পত্রে প্রফেসর জুরেক এবং তাঁর সহকর্মীরা বলেন ডার্ক মেটার কোনো অচেনা এলাকার (Clavin, 2020) অংশ। এগুলির স্ট্যান্ডার্ড মডেলের আদি উপাদানগুলির মতোই (ফোটন, ইলেকট্রন, কোয়ার্ক ইত্যাদি) নিজস্ব ও গতিশীল আদি উপাদান আছে। আমাদের পরিচিত মহাবিশ্বের বিপরীতে এই অচেনা এলাকার উপাদানগুলি কোনো ডার্ক মহাবিশ্বে (Dark Universe) অবস্থান করছে। তাঁরা আরো বলেন, এই অচেনা জগতের ডার্ক মেটারের উপাদানগুলি নিজেদের মধ্যে ক্রিয়া-প্রতিক্রিয়া করে থাকে এবং কখনো কখনো কোনো প্রাকল্পিক বহনকারী কণার (Messenger particle) মাধ্যমে আমাদের এই পরিচিত মহাবিশ্বে প্রবেশ করতে পারে। কিন্তু এগুলি WIMPs কণার সম্পুর্ণ বিপরীত- এখানে বলা হয়েছে এই কণাগুলি আমাদের মহাবিশ্বের দুর্বল বলের (Weak interacting force) সাথে ক্রিয়া-প্রতিক্রিয়ায় লিপ্ত হয় এবং তাদের মধ্যে ভারি কণার বিনিময় হয়। তাঁরা বলেন WIMPs কণাগুলির তুলনায় এই অচেনা জগতের কণাগুলির ভর ও শক্তি অনেক কম হবে। এখানে প্রফেসর জুরেক বলেন, "We are moving to a new frontier of lighter dark matter, At first we call these particles hidden valleys because the idea was that you would climb a mountain pass and look down to very low energy particles."

এই ধরনের Hidden-sector dark matter এর কতিপয় প্রকল্প:

- Dark Photon: শক্তি বহনকারী প্রাকল্পিক কণা যেগুলি ডার্ক মেটারের সাথে যুক্ত থাকতে পারে।
- Fifth Force: প্রকৃতিতে একটি মৌলিক পঞ্চম শক্তির অস্তিত্ব আছে।
- Dual Photon: ফোটনের একটি ডুয়াল (Dual) প্রাকল্পিক কণার অস্তিত্ব আছে।
- Photino: ফোটনের কোনো সুপার পার্টনার আছে। (Clavin, 2020)

মহাকর্ষীয় লেন্স (Gravitational Lensing)

এখন পর্যন্ত বিজ্ঞানীরা ডার্ক মেটার এবং ডার্ক এনার্জীকে বাস্তবে পর্যবেক্ষণ করার সরাসরি কোনো যান্ত্রিক পদ্ধতি আবিষ্কার করতে পারেন নি। মহাবিশ্বের বস্তুরাজির ওপর গবেষণার জন্য সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ পদ্ধতি হলো GL । এখন পর্যন্ত জানা মতে এই মহাবিশ্বের দূরবর্তী অঞ্চলের গ্রহ-নক্ষত্র, বা গ্যালাক্সির

ওপর গবেষণার জন্য এই পদ্ধতির কোনো বিকল্প নেই। এই টেকনিকটির প্রথম তাত্ত্বিক রূপরেখা প্রস্তাব করেন আইনস্টাইন এবং "Gravitational Lensing" ধারনাটি ব্যবহার করেন (Britannica, 2023)।

GL পদ্ধতির মাধ্যমে এই মহাবিশ্বের ভরও মাপা হয়। বিশেষত মহাবিশ্বের দূরবর্তী এলাকায় অবস্থানরত উপাদানগুলির ভর বা অন্যান্য বৈশিষ্ট্য এই পদ্ধতিতে মাপা হয়। অতি দূরবর্তী কোনো উৎস থেকে যখন কোনো আলোকরশ্মি বিকিরিত হয়ে বিভিন্ন মহাজাগতিক বস্তুরাজির মধ্য দিয়ে যেমন, Cluster of Galaxies, প্রবাহিত হয়ে কোনো পর্যবেক্ষকের কাছে পৌঁছে (ধরা যাক পৃথিবীতে অবস্থানরত কোনো বিজ্ঞানী হলেন এই পর্যবেক্ষক), তখন উপর্যুক্ত বস্তুপুঞ্জের মহাকর্ষীয় আকর্ষণের কারণে আলোর গতিপথে সামান্য পরিবর্তন ঘটে। এই সমস্ত প্রক্রিয়াটিতে ঐ বস্তুপুঞ্জ হলো GL। এককথায়, GL এর সংজ্ঞা হলো স্পেসের কোনো বস্তুর মহাকর্ষীয় আকর্ষণের কারণে আলোর গতির যে বিচ্যুতি ঘটে, তা নির্ণয়ের এবং তা থেকে বস্তুটির ভর পরিমাপের একটি পদ্ধতি (চিত্র ৮)।

চিত্র ৮: This image portrays how the gravitational lensing phenomenon, induced by a common galaxy, channels light from a remote galaxy merger, where star formation is occurring. The outcome is a distorted yet amplified view (Image Credit: ESA/ESO/M. Kornmesser at sci.esa.int, 2024).

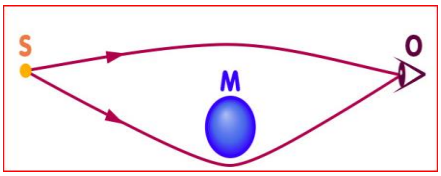
নিউটন ১৭০৪ সালে প্রথম তাঁর Optics গ্রন্থে মহাবিশ্বে পরিভ্রমণকালে আলোর গতিপথ বেঁকে যাওয়ার সম্ভাবনার কথা বলেন। তিনি বলেন, মহাবিশ্বের বড় ধরনের বস্তুর পাশ দিয়ে আলো অতিক্রম করার সময় বস্তুটির মহাকর্ষীয় আকর্ষণের কারণে আলোর প্রতিসরণ (Deflection) ঘটতে পারে। তাঁর কাজটি ছিল মূলত তাত্ত্বিক। অবশ্য তিনি তাঁর বক্তব্যের একটা গাণিতিক ব্যাখ্যাও প্রণয়ন করেছিলেন। কিন্তু তাঁর কাজটি বহুদিন অবহেলিত অবস্থায় পড়ে থাকে। অবশেষে ১৭৮৪ সালে বিজ্ঞানী জন মিচেল (John Mitchell) তত্ত্বটির পুনোরুজ্জীবন করেন। তিনি বলেন সূর্যের আলো পৃথিবীতে প্রবেশের সময় আবহাওয়া মন্ডলগুলির বিভিন্ন উপাদানের সাথে সংঘর্ষের কারণে আলোর গতিপথ বেঁকে (Redshift) যেতে পারে (Hugh, 1911)।

এরপর এগিয়ে আসেন ফন সোল্ডনার (Von Soldner)। তাঁর গবেষণাপত্রটি ১৮০১ সালে করা কিন্তু প্রকাশিত হয় ১৮০৪ সালে। তিনি একই ধরনের গাণিতিক হিসাব করে বলেন, সূর্যের কাছাকাছি অবস্থিত

তারকাগুলি থেকে নির্গত আলোক রশ্মি যখন সূর্যের পাশ দিয়ে অতিক্রম করে, তখন সেখানে প্রতিসরণের মান হয় ০.৮৪ Arcsec। কিন্তু এই সময়টায় বিজ্ঞানী মিচেল এবং সোল্ডনারের ক্ষুদ্র উপাদানের বিকিরণের তত্ত্ব দুটি অবহেলিত অবস্থায় পড়ে থাকে। কারণ তখন পর্যন্ত বিজ্ঞানীরা আলোর কণাধর্মী বৈশিষ্ট্যের কথা জানতেন না এবং আলোর তরঙ্গধর্মী তত্ত্বকে সঠিক বলে মনে করতেন (Wikipedia, 2024c)।

১৯১১ সালে এই তত্ত্বটির ওপর আইনস্টাইন আপেক্ষিক তত্ত্বের প্রেক্ষাপটে একটি গাণিতিক হিসাব করেন এবং ভবিষ্যৎবাণী করেন যে, সম্ভবত মহাকর্ষীয় আকর্ষণের কারণে আলোর গতিপথ বেঁকে যায়। যার ফলাফল বিজ্ঞানী ফন সোল্ডনারের ফলাফলের খুব কাছাকাছি ছিল। এই কারণে তৎকালীন কিছু বিজ্ঞানী আইনস্টাইনের বিরুদ্ধে নকলের (Plagiarism) অভিযোগ আনেন, যা সম্পুর্ণ ভুল ছিল। কিন্তু এই ভুল বিব্রতকর অভিযোগের কারণে গত শতকের বিশের দশকে আইনস্টাইনকে অপমানকর পরিস্থিতির সম্মুখীন হতে হয় (Goldhaber, G. 2008)।

১৯১৯ সালে বিজ্ঞানী এডিংটন এবং ডাইসন সূর্যগ্রহণের সময় একটি বাস্তব পরীক্ষা করেন এবং আইনস্টাইনের ভবিষ্যৎবাণী সঠিক বলে প্রমাণ করে GL তত্ত্বের বাস্তব প্রমাণ দেন (Sauer, 2010)।



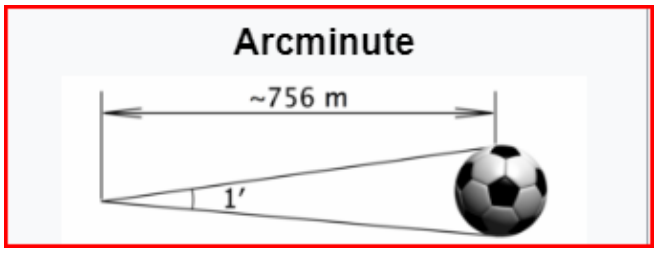
চিত্র ৯: In this depiction, a lens with a mass "M" bends light from a distant source "S" so that it reaches an observer "O" via two separate paths. Consequently, "O" perceives two distinct images of "S". (Credit: Sauer, 2010).

GL এর ক্রমবিকাশে পরবর্তী মৌলিক অবদান রাখেন ক্যালটেকের বিজ্ঞানী Fritz Zwicky। তাঁর গবেষণাটি থেকেই সত্যিকার অর্থে এই বিষয়ের উপর আধুনিক গবেষণার পথ খুলে যায় এবং তাঁর কাজটি পর্যবেক্ষণগত, কেবল তাত্ত্বিক নয়।

GL এর প্রকারভেদ

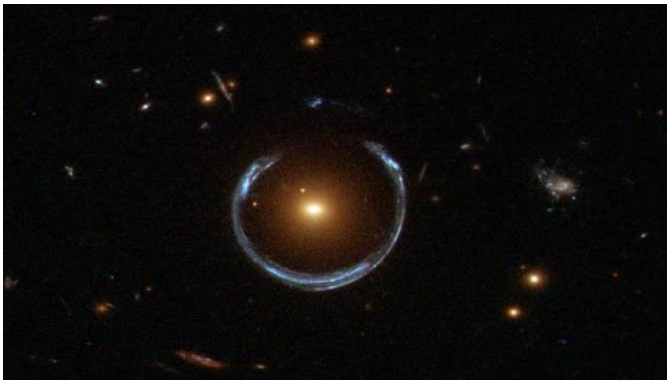
GL এর তিনটি প্রকার আছে। সেগুলি হলো Strong lensing, Weak lensing এবং Micro lensing।

Strong lensing: GL এর যে বিচ্যুতিগুলি তুলনামূলকভাবে সহজভাবে দেখা যায় সেগুলিকে বলা হয় স্ট্রং লেন্সিং। যেমন Einstein rings এর ছবি। এখানে যদিও বলা হচ্ছে স্ট্রং কিন্তু সেগুলিও অকল্পনীয় ক্ষুদ্র। যে কারণে ওপরে "তুলনামূলক" শব্দটি ব্যবহার করেছি। উদাহরণ- কোনো একটি গ্যালাক্সির ভর যদি সূর্যের চেয়ে ১০০ বিলিয়ন গুণ বেশি হয়, তার যে একাধিক ছবি ওঠে, সেগুলির মধ্যে মাত্র কয়েক আর্কসেকেন্ড (Arcsecond এটি কৌণিক মাপনক্রিয়ার একটি একক, যেমন এক ডিগ্রীর ১/৩৬০০ অংশ হলো এক আর্ক সেকেন্ড) ফাঁক থাকে।



চিত্র ১০: In this depiction, the observer's distance was manually determined from the ball's circumference, measuring approximately 756 m. (Credit: Wikimedia Commons, 2007, Author: RU). URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arcsecond_and_football.png

কিন্তু GL যদি একটি সমগ্র গ্যালাক্সিপুঞ্জ (Galaxy Cluster) হয় তখন সেখানে পার্থক্যটা কয়েক আর্কমিনিট (Arcminute এটিও একটি কৌণিক মাপনক্রিয়ার একটি একক। যেমন- এক ডিগ্রির ১/৬০ হল এক আর্কমিনিট) হতে পারে। উভয় ক্ষেত্রেই উপর্যুক্ত গ্যালাক্সিগুলি অনেক দূরে অবস্থিত; সেটি কয়েকশ মেগাপারসেকও (Megaparsec) হতে পারে।



চিত্র ১১: The image shows the gravitational pull of a bright red galaxy warping the light from a distant blue galaxy. Typically, this distortion creates two distinct images of the distant galaxy. However, in this case, the alignment of the lens is so precise that the background galaxy is transformed into a horseshoe shape, forming a nearly complete ring. This phenomenon is known as an Einstein Ring (Credit: Wikimedia Commons. 2011a, Lensshoe_hubble.jpg).

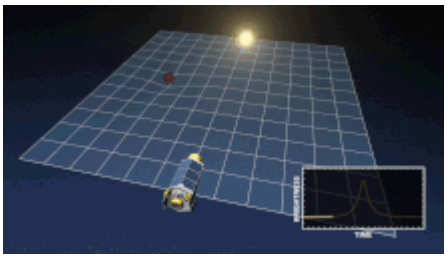
Weak lensing: যখন কোনো উৎসের আলো GL এর মধ্য দিয়ে অতিক্রম করে, তখন কিছু কিছু বিচ্যুতি এতই ক্ষুদ্র হয় যে, তাদেরকে ছবির মধ্যে ধরে রাখা যায় না। এই ধরনের বিচ্যুতিগুলিকে নির্ণয় করা হয় বড় ধরনের সংখ্যাগুলির পরিসংখ্যানগত হিসাব-নিকাশের মাধ্যমে। এই দুর্বল লেন্সিং এর মাধ্যমেই বর্তমানে বিজ্ঞানীরা ডার্ক মেটার এবং ডার্ক এনার্জীর পরিক্ষণগত প্রমাণ প্রতিষ্ঠার জন্য গবেষণা করছেন (Wikipedia, 2024d) ।

সাধারণত এই ধরনের পরীক্ষণের জন্য বিশাল গ্যালাক্সি-পুঞ্জকে নির্বাচন করা হয়। এই পদ্ধতিতে বিশ্ব তাত্ত্বিক প্যারামিটারগুলির স্বরূপ ও বৈশিষ্ট্য আবিষ্কারের জন্যে গবেষণা হচ্ছে। যেমন- স্ট্যান্ডার্ড বা

লাম্বাডা সিডিএম মডেলের লাম্বাডা ধ্রুবকটি। তাছাড়া এখান থেকে বিজ্ঞানীরা ডার্ক মেটার এবং ডার্ক এনার্জীর পর্যবেক্ষণগত প্রমাণ আবিষ্কারের জন্যও গবেষণা করছেন, কারণ ডার্ক মেটার বা ডার্ক এনার্জী nonbaryonic উপাদান।

Microlensing: মাইক্রোলেন্সিং GL এরই একটি বিশেষ দিক (Phenomenon)। মাইক্রোলেন্সিং এর মাধ্যমে মহাবিশ্বের যেসব উপাদানগুলি খুবই ক্ষীণ আলো বিকিরণ করে বা একেবারেই বিকিরণ করে না, তাদেরকে শনাক্ত করা যায়। এই পদ্ধতির প্রথম তাত্ত্বিক প্রকল্পের প্রস্তাব করেন বিজ্ঞানী রেফস্টাল (Refstal); আর তা বাস্তবে আবিষ্কার করেন বিজ্ঞানী এরউইন (Irwin), ১৯৮৮ সালে।

এই মহাবিশ্বের বড় ধরনের উপাদানগুলি, মহাবিশ্বের সমগ্র উপাদানের পরিমাণের তুলনায় খুবই কম, মহাবিশ্বের অধিকাংশ উপাদানই হলো অদৃশ্য। জ্যোতির্বিজ্ঞানীরা শুধুমাত্র উজ্জ্বল বস্তুগুলি, যেগুলি আলো বিকিরণ করে (যেমন তারা) অথবা কোনো বড় ধরনের বস্তু বা বস্তুপুঞ্জ, যেগুলি আলোর গতিপথকে পরিবর্তন করে (Cluster of gas বা ধুলা) তাদের ওপরই গবেষণা করে থাকেন। এই অদৃশ্য উপাদানগুলি এখন পর্যন্ত আমাদের পর্যবেক্ষণের ক্ষমতার বাইরে। ঠিক এই ধরনের উপাদানগুলির উপরই গবেষণায় এই মাইক্রোলেন্সিং পাদ্ধতি ব্যবহার করা হয়। যেমন- ডার্ক মেটার এবং ডার্ক এনার্জী।



চিত্র ১২: Gravitational microlensing of the light of a distant background star by a passing rogue exoplanet (Image credit: NASA Ames/JPL-Caltech/T. Pyle – 2016). As an exoplanet moves in front of a more distant star, its gravity bends the starlight's path, sometimes causing a brief brightening of the background star as observed through a telescope. This gravitational microlensing phenomenon enables scientists to discover exoplanets that are too distant and dark to detect any other way.

GL এর মাধ্যমে দূরবর্তী মহাবিশ্বের যেসব বস্তুরাজির আলো বিকিরিত হয়ে পৃথিবীতে কোনো পর্যবেক্ষকের কাছে পৌঁছে, তখন আলোর গতিপথ কিছুটা বেঁকে যায়। এই বেঁকে যাওয়ার কারণে পার্শ্ববর্তী কিছু ক্ষুদ্রাতিক্ষুদ্র উপাদান দৃষ্টিগোচর হয়ে উঠতে পারে; যেটা আলোর গতিপথ বদল না হলে সম্ভব হতো না। এটিই হলো মাক্রোলেন্সিং। এই প্রক্রিয়ায় বিজ্ঞানীরা অসংখ্য অদৃশ্য বা প্রায় অদৃশ্য নতুন মহাজাগতিক বস্তুরাজি আবিষ্কার করছেন (Wikipedia, 2024e)।

ডার্ক এনার্জী তত্ত্বের সংক্ষিপ্ত পরিচিতি ও ক্রমবিকাশ

যদিও ইতোমধ্যে বিজ্ঞানীরা ডার্ক এনার্জীর অস্তিত্ব পর্যবেক্ষণের মাধ্যমে পরোক্ষভাবে প্রমাণ করেছেন, তা সত্ত্বেও ডার্ক এনার্জী অনেক বেশি প্রাকল্পিক অবস্থায় রয়ে গেছে, ডার্ক মেটারের তুলনায়। ডার্ক এনার্জীর চরিত্র- বৈশিষ্ট্যের অনুমানগুলি বিজ্ঞানীদের কাছে নিতান্ত বিবেচনার (Speculation) বিষয় (Overbye, 2003)।

এখন পর্যন্ত বিজ্ঞানীদের অনুমান হলো, ডার্ক এনার্জী মহাবিশ্বে সমসত্ত্বভাবে (Homogeneously) বিস্তারিত। এদের ঘনত্ব অনেক কম; মহাকর্ষীয় বল ছাড়া এরা প্রকৃতির অন্যান্য বলগুলির সাথে কোনো ক্রিয়া-প্রতিক্রিয়া করে না। ডার্ক এনার্জী মহাকর্ষ বলের সাথে বিকর্ষণধর্মী, বিজ্ঞানে এটিকে অনেক সময় "Gravitational Repulsion" বলা হয়। গাণিতিকভাবে ডার্ক এনার্জী মহাবিশ্বে $10^{-27}/kgm^3$ হারে ছড়িয়ে আছে। এই পরিমাণটি এতই ক্ষুদ্র যে এটি ল্যাবের প্রযুক্তির মাধ্যমে পর্যবেক্ষণ করা সম্ভব নয় এবং এই ৬৮% ডার্ক এনার্জী খালি স্পেসে (Empty Space) আছে। খালি স্পেস শূন্য নয়, সেখানে ভ্যাকুয়াম এনার্জি থাকে এবং বিজ্ঞানীরা বলেন সম্ভবত সেখান থেকেই উৎসারিত হয় ডার্ক এনার্জী ।

ডার্ক এনার্জীর সবচেয়ে পুরাতন ও সরল ব্যাখ্যা ছিল শক্তির ঘনত্ব শূন্য স্পেসে (Empty Space) থাকে, যাকে বিজ্ঞানের ভাষায় "Vacuum Energy" বলা হয়। গাণিতিকভাবে Vacuum Energy আইনস্টাইনের মহাজাগতিক ধ্রুবকের সমান। কোয়ান্টাম জগতে কোনো সুপারসিমেট্রি যখন কোয়ান্টাম Fluctuation এর কারণে ভেঙে যায়, তখন সেখান থেকে খালি Virtual বস্তু-প্রতিবস্তু জোড়া হিসেবে উদ্ভূত হয়। যেহেতু তারা সম্পূর্ণ বিপরীতধর্মী, তাদের মধ্যে সংঘর্ষ ঘটে এবং উপাদানদ্বয় বিলীন (Annihilate) হয়ে যায় এবং উদ্ভব হয় এনার্জীর, এটিই হলো ভ্যাকুয়াম এনার্জি। বিশ্বতাত্ত্বিক ভ্যাকুয়াম এনার্জির পর্যবেক্ষিত পরিমাণ হলো প্রতি কিউবিক সেন্টিমিটারে $১০^{-১০}$ ergs । কিন্তু কোয়ান্টাম ক্ষেত্র তত্ত্বের ভবিষ্যৎবাণী হলো প্রতি কিউবিক সেন্টিমিটারে এই পরিমাণ $১০^{১১০}$ ergs (আর্গ হলো শক্তিকে মাপার একটি একক যা $১০^{-৭}$ জুল (Joules) এর সমান)। বিজ্ঞানীরা অবশ্য অনেক আগে থেকেই এই $১০^{১২০}$ গুণ বিশাল পার্থক্যের কথা জনতেন। এই সমস্যার কোনো সন্তোষজনক সমাধান এখন পর্যন্ত বিজ্ঞানীরা করতে পারেন নি। এই এখানে অনেক বিজ্ঞানী সমাধান হিসেবে স্ট্রিং তত্ত্বকে প্রস্তাব করেন (Britannica, 2023)।

ডার্ক মেটার এবং ডার্ক এনার্জীর বিজ্ঞানীরা এই মহাবিশ্বের ভর ও শক্তির পরিমাপ করে দেখেন, শক্তির প্রেক্ষাপটে এই মহাবিশ্বে যে পরিমাণ ভর-শক্তি থাকার কথা, তার চেয়ে অনেক কম পরিমাণ ভর এখানে আছে। এই পরিস্থিতিতে বিজ্ঞানীরা আইনস্টাইনের মহাজাগতিক ধ্রুবককে যুক্ত করে সমস্যাটির একটি প্রাকল্পিক সমাধান প্রস্তাব করেন। এটি চূড়ান্ত বিচারে সমাধান হিসেবে প্রমাণিত না হলেও, আইনস্টাইনের ঐ মহাজাগতিক ধ্রুবকটি আবার সঞ্জিবীত হয়ে ওঠে, এবং বিজ্ঞানীরা বলেন, সম্ভবত এখানেই আছে ডার্ক এনার্জীর অস্তিত্বের পরোক্ষ ইঙ্গিত। আর ১৯৯৮ সালে বিজ্ঞানীরা তা পর্যবেক্ষণগতভাবে প্রমাণ করেন (Perlmutter et al., 1998)।

মহাবিশ্বে ডার্ক এনার্জীর অস্তিত্বের প্রথম ইঙ্গিত আসে আইনস্টাইনের সার্বিক আপেক্ষিক তত্ত্ব থেকে, যদিও তা আইনস্টাইনের অজান্তেই ঘটেছিল। আইনস্টাইন লক্ষ্য করেন, প্রণীত আপেক্ষিক তত্ত্বের সমিকরণগুলির কারণে এই মহাবিশ্ব প্রসারণশীল অথবা সংকোচনশীল হয়ে পরে। সেই সময়টায় স্থির মহাবিশ্ব তত্ত্বটি বিজ্ঞানী মহলে সঠিক বলে মনে করা হতো। তাই তিনি স্থির মহাবিশ্ব তত্ত্বটি, তাঁর আপেক্ষিক তত্ত্বে সংযোজনের জন্য, সমিকরণে একটি মহাকর্ষীয় ধ্রুবক (Lambada, Λ) যুক্ত করেন।

আইনস্টাইন বলেন এই মহাবিশ্বে খালি ক্ষেত্র (Empty Space) আছে এবং খালি ক্ষেত্রগুলি খালি নয়, সেখানে শক্তিও (Vacuum Energy) থাকে। এখানে তাঁর চিন্তা ছিল স্থির মহাবিশ্ব কখনো স্থায়ী (Stable) হতে পারেনা। কেননা ভারসাম্য (Equilibrium) কখনোই স্থায়ী নয়। এই মহাবিশ্ব মহাকর্ষ বলের আকর্ষণের কারণে এক সময় সংকোচিত হতে থাকবে অথবা অসমসত্ত্বতার (Inhomogeneities) কারণে মহাবিশ্বের ভারসাম্যে (Equilibrium) পরিবর্তন ঘটবে। সুতরাং এই মহাবিশ্ব যদি খুব সামান্য প্রসারিত হয়, তার অর্থ হলো সেখানে কিছু শূন্য ক্ষেত্র তৈরি হয়। সুতরাং যত বেশি শূন্য ক্ষেত্র তৈরি হবে, তত বেশি শূন্য শক্তি (Vacuum Energy) ও উৎপাদিত হতে থাকবে এক সময় তা মহাকর্ষ বলের চেয়ে বেশি শক্তিশালী হয়ে উঠবে এবং মহাবিশ্ব ধ্বংস (Big Rips) হয়ে যাবে। অন্যদিকে মহাকর্ষ বল যদি ক্রমশ শক্তিশালী হতে থাকে, নতুন মহাজাগতীয় উপাদানের উৎপাদনের জন্য, তাহলে এক সময় মহাবিশ্বের সংকোচন শুরু হবে এবং মহাবিশ্ব সিংগুলারিটিতে (Big Crunch) প্রত্যাবর্তন করবে। এই সমস্যার সমাধানের জন্যই আইনস্টাইন তাঁর আপেক্ষিক তত্ত্বে মহাজাগতিক ধ্রুবক সংযোজন করেন, যা মহাকর্ষীয় বলের বিপরীত অর্থ্যাৎ বিকর্ষণধর্মী এবং সেই কারণেই মহাবিশ্ব সংকোচিতও হবে না, আবার প্রসারিতও হবেনা, মহাবিশ্ব হবে চিরস্থির। এবং এই বিকর্ষণধর্মী শক্তির ধারনার মধ্যেই লুকিয়ে ছিল ডার্ক এনার্জীর ধারনা, যা তৎকালীন বিজ্ঞানীরা উপলব্ধি করতে পারেননি, আইনস্টাইন নিজেও নন। তাই পরর্বতীতে বিজ্ঞানী হাবল যখন প্রসারমান মহাবিশ্বের পর্যবেক্ষণগত প্রমাণ দেন, তখন আইনস্টাইন বলেছিলেন বিজ্ঞানের গবেষণায় এটা ছিল তাঁর সবচেয়ে বড় ভুল।

বিজ্ঞানীরা ডার্ক এনার্জীর পর্যবেক্ষণগত প্রমাণের জন্য প্রথমে কোন গ্যালাক্সি বা গ্যালাক্সিপুঞ্জের ভর নির্ণয় করেন। সেই ভরের প্রেক্ষাপটে শক্তির পরিমাণকে মাপতে গিয়ে দেখেন, সেখানে ভরের তুলনায় শক্তির পরিমাণ অনেক বেশি; তার অবধারিত যৌক্তিক পরিণতি হলো গ্যালাক্সি এবং গ্যালাক্সিপুঞ্জগুলিতে অবশ্যই আরো বিপুল পরিমাণের অদৃশ্য বস্তুগত উপাদান রয়েছে, নয়তো ঐ বাড়তি শক্তি আসবে কোথা থেকে?

এই প্রশ্নের উত্তর পাওয়ার জন্য তাঁরা প্রথমে কোনো একটি গ্যালাক্সিপুঞ্জের মহাকর্ষীয় অস্থিতির (Instabilities) কারণে যে সমস্ত গ্যালাক্সি তৈরি হয়, তাদের উৎপাদনের হার নির্ণয় করেন। এখানে তাঁরা ব্যবহার করেন টেলিস্কোপ, গ্রাভিটেশনাল লেন্সিং এবং ডপলার পদ্ধতিকে। সেখানে থেকে তারা অতীত মহাবিশ্বের বিবর্তনের হারকে নির্ণয় করেন। তবে এই পদ্ধতিতে মহাজাগতিক বস্তুগুলির যথাযথ দূরত্ব নির্ণয় করা অত্যন্ত কঠিন এবং পরোপুরি নির্ভরযোগ্য নয়। কারণ ডার্ক এনার্জীর পরিমাণ যত বৃদ্ধি পাবে,

এই মহাবিশ্বের প্রসারণের গতি সেই হারেই বাড়তে থাকবে এবং মহাজাগতিক উপাদানের উৎপাদনের হার ততই কমতে থাকবে।

১৯৩৩ সালে বিজ্ঞানী ৎসুয়িকির গবেষণাটির মাধ্যমে ডার্ক মেটার এবং ডার্ক এনার্জীর অনুসন্ধানের বৈজ্ঞানিক অভিযাত্রা শুরু হয়। তিনি আবিষ্কার করেন এই মহাবিশ্বে ডার্ক মেটার এবং ডার্ক এনার্জীর অস্তিত্ব আছে, শুরুতে তিনি এগুলিকে "Missing mass" বলে অভিহিত করেছিলেন। কিন্তু তখন পর্যন্ত ডার্ক এনার্জী ক্ষেত্রের সাথে যে আইনস্টাইনের মহাজাগতিক ধ্রুবকের একটা সম্পর্ক থাকতে পারে তা বিজ্ঞানীরা অনুমান করতে পারেন নি।

বিজ্ঞানী ৎসুয়িকির আবিষ্কারের পর পঞ্চাশের দশক পর্যন্ত ডার্ক মেটার এবং ডার্ক এনার্জীর ওপর তেমন কোনো উল্লেখযোগ্য গবেষণা হয় নি। কিন্তু ষাটের দশকে বিজ্ঞানী পেনজিয়াস এবং বিজ্ঞানী উইলসনের CMBR বিকিরণ আবিষ্কারের পর পরিস্থিতি সম্পূর্ণ বদলে যায়। কণাপদার্থবিদ্যা, বিশ্বতত্ত্ব, জ্যোতিপদার্থবিদ্যা ইত্যাদি প্লাটফর্মগুলি আবার বিজ্ঞানী ৎসুয়িকির "Missing mass" কে শনাক্ত করার জন্য "কোমর বেধে" গবেষণায় নেমে পড়েন এবং ষাটের দশক থেকে এই বিষয়ের ওপর অসংখ্য গবেষণাপত্র প্রকাশিত হয়। কিন্তু এই গবেষণাপত্রগুলির অধিকাংশই ছিল ডার্ক মেটারের ক্ষেত্রে; সেখানে প্রসংগক্রমে ডার্ক এনার্জীর বিষয়টি আলোচিত হয়েছিল।

তবে আশির দশকে যখন বিজ্ঞানী এলান গুথ (Alan Guth), বিজ্ঞানী আলেক্সি স্টারোবিনস্কি (Alexi Strobinosky) এবং আন্দ্রেই লিন্ডে (Andrei Linde) তাঁদের মহাজাগতিক স্ফিতিতত্ত্ব (Cosmic Inflation) প্রস্তাব করেন, তখন পরিস্থিতি বদলে যায়। কারণ তাঁদের এই তত্ত্বের সাথে ডার্ক এনার্জীর প্রাকল্পিক বৈশিষ্ট্যগুলির ঘনিষ্ট মিল ছিল।

এই তত্ত্বে বলা হয়েছে, মহাবিশ্বে ঋণাত্মক চাপের ক্ষেত্র রয়েছে, যেগুলির সাথে ডার্ক এনার্জীর উপর ভবিষ্যৎবাণী করা চরিত্র-বৈশিষ্ট্যের সাথে ঘনিষ্ট মিল আছে; যেগুলি সম্ভবত আদি মহাবিশ্বের প্রসারণের ক্ষেত্রে অন্যতম মূল ভূমিকা পালন করেছিল। এই প্রসারণের গতি অকল্পনীয় দ্রুত ছিল এবং তা চক্রক্রম (Exponential) হারে বৃদ্ধি পেয়েছিল। আর এই স্ফিতি মহাবিশ্বের জন্মের পরের এক সেকেন্ডের চেয়ে অনেক অকল্পনীয় ক্ষুদ্র সময়ের পরিসরে ঘটেছিল এবং সমাপ্ত হয়েছিল (Wikipedia. 2024f)।

এখানে বিজ্ঞানীরা বলেন, সাম্প্রতিক গবেষণার প্রেক্ষাপটে মহাবিশ্বে ডার্ক এনার্জীর ঋণাত্মক ঘনত্বের যে পরিমান নির্ণয় করা হয়েছে, স্ফিতির সময় তার পরিমাণ অনেক বেশি ছিল। তবে তখন পর্যন্ত বিজ্ঞানীদের কাছে স্পষ্ট ছিল না, ঐ মহাস্ফিতি থেকেই ডার্ক এনার্জীর উদ্ভব হয়েছিল কি-না। আর মহাস্ফিতি তত্ত্বের বিকাশের পর বিজ্ঞানীরা ভেবেছিলেন সৃষ্টি তত্ত্বে মহাজাগতিক ধ্রুবকের আর প্রয়োজন নেই।

বস্তুত "Dark Energy" এর পর্যবেক্ষণগত প্রমাণের গবেষণাটি শুরু হয় ১৯৮০ দশকের শেষের দিকে। শুরুতে বিজ্ঞানীদের লক্ষ্য ছিল সেই সময়ের বিজ্ঞানীদের যে বিশ্বাস ছিল এই মহাবিশ্ব ক্রমশ সংকোচিত হচ্ছে তত্ত্বটি- তা পরীক্ষা করে দেখা। এই প্রশ্নের যথাযথ উত্তর পাওয়ার জন্য দুটি গবেষক দল প্রায় একই সময়ে কিন্তু পৃথকভাবে গবেষণা করে। প্রথম গবেষক দলটি গবেষণা শুরু করেন Lowrance

Berkeley National Laboratory এর বিজ্ঞানী সাউল পার্লমুট্টার (Saul Perlmutter) এর নেতৃত্বে। তাঁদের প্রজেক্টের নাম ছিল Supernova Cosmology Project এবং এখানে তাঁরা 1a Supernova গুলিকে বিষয়-বস্তু হিসেবে নির্বাচন করেন। তবে এই গবেষক দলটি গড়ে তোলার আদি উদগাতা ছিলেন বিজ্ঞানী রিচার্ড মুলার (Richard A. Muller) এবং বিজ্ঞানী পেনিপেকার (Pennypacker)। আর পার্লমুট্টার ছিলেন বিজ্ঞানী মুলারের ছাত্র। এই একই নির্দেশনায় Australian National University এর বিজ্ঞানী ব্রায়ান স্মিথ (Brain Schmidt) এবং Space Telescope Science Institute এর বিজ্ঞানী আদম রিস (Adam Riess) এর নেতৃত্বে High-Z Supernova নামে আরেকটি প্রজেক্ট গঠিত হয় । দুটি গবেষক দলই পৃথিবীর শক্তিশালীতম টেলিস্কোপগুলি এবং স্পেসের হাবল টেলিস্কোপকে ব্যবহার করেন এবং সাত বিলিয়ন আলোকবর্ষ আগের 1a Supernova গুলির তথ্য-উপাত্ত বিশ্লেষণ করে দেখেছেন এই মহাবিশ্ব প্রসারিত হচ্ছে এবং তা চিরকালের জন্য চলতে থাকবে ও এই তথ্য-উপাত্তগুলিকে মহাবিশ্বের ধ্রুবকের (Cosmological Constant) মাধ্যমে ব্যাখ্যা করা যায় (Goldhaber, G. 2008)।

১৯৯৮ সালে সাইন্স ম্যাগাজিনে এই গবেষণার ওপর একটি প্রতিবেদন প্রকাশিত হয়, সেখানে উপসংহারে বলা হয়েছে, "……. An observation that implies the existence of mysterious, self-repelling property of space first proposed by Einstein, which he called the cosmological constant" (Perlmutter et al., 1998)।

১৯৯৬ সালে High-Z Team তাঁদের ডাটা প্রকাশ করে। তাঁদের সিদ্ধান্ত ছিল, মহাবিশ্বের প্রসারণের গতি স্লথতো হচ্ছেই না, বরং দ্রুততর হচ্ছে এবং মহাকর্ষ শক্তির বিপরীত কোনো রহস্যময় শক্তির মাধ্যমে তা ঘটছে। সেই সময়কার বিজ্ঞান বিশ্বে এটি ছিল একটি অবিশ্বাস্য ও আলোড়ন সৃষ্টিকারী সিদ্ধান্ত। কারণ তখন পর্যন্ত বিজ্ঞানীদের ধারনা ছিল এই মহাবিশ্ব মহাকর্ষীয় আকর্ষণের কারণে ক্রমশ সংকোচিত হবে (APS125, 2009)। ঐ বছরই বিশ্বতত্ত্ববিদ মিশাইন টার্নার (Michael Turner) এই রহস্যময় শক্তির নামকরণ করেন "Dark Energy" (Wikipedia. 2024f)। পরবর্তী দশ বছরের বিভিন্ন বৈজ্ঞানিক গবেষণায় বিজ্ঞানীরা নিশ্চিত হন, এই মহাবিশ্ব প্রসারণশীল এবং প্রসারণের বেগ ক্রমশ বাড়ছে। কিন্তু ঐ রহস্যময় Dark Energy অচেনাই থেকে যায় (CTC, 2024)।

বর্তমান বিশ্বের অনেক বিজ্ঞানী বলেন ডার্ক এনার্জির একটা সম্ভাব্য প্রার্থী হলো আইনস্টাইনের মহাজাগতিক ধ্রুবক; কিন্তু সেখানেও সমস্যা আছে। বিজ্ঞানীরা ডার্ক এনার্জির পরিমাণের যে সিদ্ধান্তে পৌঁছেছেন, তার মান আইনস্টাইনের ধ্রুবকের চেয়ে $১০০^{১২০}$ গুন বেশি (APS125, 2009)।

কোয়ান্টাম তত্ত্বে Vacuum Fluctuation এর জন্য যে Virtual উপাদানগুলির উৎপাদন হচ্ছে, সেগুলির এনার্জি Empty Space এ অবস্থান নেয় এবং এই প্রক্রিয়াটি থেকেই বিজ্ঞানীরা ঐ হিসাবটি করেছেন। এখনো বিজ্ঞানীরা এই বিষয়ে নিশ্চিতভাবে তেমন কিছুই জানতে পারেন নি, তাই এই রহস্যময় ডার্ক এনার্জি সত্যই ডার্ক মেটারের বৈশিষ্ট্য কি-না সে বিষয়ে বিজ্ঞানীরা এখনো নিশ্চিত নন (Britannica, 2023)।

উপসংহার

বস্তুত বৈজ্ঞানিক বিশ্বতত্ত্বে বস্তু ও শক্তিকে কখনোই পৃথক পৃথকভাবে ব্যাখ্যা করা যায় না, বিষয় দুটি ওতপ্রোতভাবে জড়িত। শক্তি থেকেই বস্তু তৈরি হয়েছে আবার শক্তি বহির্গত হয় বস্তু থেকেই। যেমন- বর্তমানের সর্বজনগৃহীত স্ট্যান্ডার্ড মডেলটি। এখানে মহাবিশ্বের পরিগঠনের মূল উপাদানগুলির কথা বলতে গেলেই অবধারিতভাবে শক্তির প্রসংগটি চলে আসে। কারণ শক্তিও কোনো সাবএটমিক শক্তি-কণার মাধ্যমে কাজ করে। আমরা স্ট্যান্ডার্ড মডেলের আদি কণাগুলি জানি বলেই শক্তির স্বরূপ ও বৈশিষ্ট্যের কথা বলতে পারি। ডার্ক মেটার এবং ডার্ক এনার্জীর ক্ষেত্রেও প্রক্রিয়াটি এক। কিন্তু এখানে সমস্যা হলো ডার্ক এনার্জীর অস্তিত্ব পর্যবেক্ষণগতভাবে প্রমাণিত হলেও, ডার্ক মেটারের পর্যবেক্ষণগত প্রমাণ বিজ্ঞানীরা এখন পর্যন্ত হাজির করতে পারেননি। তাই বিজ্ঞানীরা সেখানে বিভিন্ন পদ্ধতিতে এই সমস্যার সমাধানের চেষ্টা করছেন এবং সেখানে ডার্ক এনার্জীর অনুসন্ধানে ডার্ক মেটারের প্রসংগটি অবধারিতভাবে আর্ভিভূত হয়। শক্তি এখানেও কোনো না কোনো সাবএটমিক কণার মাধ্যমে কাজ করে।

ডার্ক মেটার বিশেষত ডার্ক এনার্জী সম্পর্কে পর্যবেক্ষণগত প্রমাণ প্রস্তাব করতে হলে প্রথমে বিজ্ঞানীদেরকে সঠিক পদ্ধতি ও প্রযুক্তি বের করতে হবে। সেটারই বিজ্ঞানীরা এখনো সন্ধান পাননি, সন্ধান করছেন। তাই তাঁরা ডার্ক মেটারকে পর্যবেক্ষণ করার জন্য, কণাপদার্থবিদ্যা, সুপারসিমেট্রি, আপেক্ষিকতত্ত্ব (মহাকর্ষীয় ধ্রুবক), কোয়ান্টামতত্ত্ব (ক্ষেত্র তত্ত্ব) এ ধরনের নানা জায়গায় অনুসন্ধান চালাচ্ছেন। অন্যদিকে কালোশক্তিকে জানার জন্য অনুসন্ধান চালাচ্ছেন আস্ট্রফিজিকস, জ্যোর্তিবিদ্যা, টেবিল-টপ, SuperCDMs ইত্যাদি মাধ্যম ও পদ্ধতিতে।

তথ্যসূত্র

Alcock, C., Allsman, R.A., Alves, D.R., Axelrod, T.S., Becker, A.C., Bennett, K.H., et al. 2000, The MACHOs Project: Microlensing Results from 5.7 Years of LMC Observations. URL: https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0001272.pdf

AMNH, 2000, Vera Robin and Dark Matter. Am. Museum of Natural History. URL: https://www.amnh.org/learn-teach/curriculum-collections/cosmic-horizons-book/vera-rubin-dark-matter

APS125. 2009, The accelerating expansion of the universe. URL: https://www.aps.org/publications/apsnews/200901/physicshistory.cfm)

Baker, C.J., Bertsche, W., Capra, A., Cesar, C.L., Charlton, M., Christensen, A.G. 2023, Design and Performance of a novel low energy multispecies beamline for an antihydrogen experiment, Physical Rev. Accelerators and Beams. 26: 040101. URL: https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevAccelBeams.26.040101

Bartone, G., Hopper, D. 2016, A History of Dark Matter. PDF: A History of Dark Matter-Gianfranco Bertone & Dan Hooper (caltech.edu)

Britannica. 2023, Gravitational Lens. Encyclopedia Britannica. URL: https://www.britannica.com/science/gravitational-lens

Clavin, W. 2020, Where is Dark Matter Hiding. Calthech magagine. URL: https://magazine.caltech.edu/post/where-is-dark-matter-hiding

Craig, N. 2014, The State of Supersymmetry after Run I of the LHC. CGI Workshop URL: https://arxiv.org/pdf/1309.0528.pdf

Griest, K. 1996, Thermal Relics as Dark Matter (Wimps). The Net Advance of Physics: The Nature of the Dark Matter. URL: Thermal Relics as Dark Matter (Wimps) (mit.edu)

CTC. 2024, The Origin of the Universe: Inflation. The Stephen Hawking Center for Theoretical Cosmology. URL: https://www.ctc.cam.ac.uk/outreach/origins/inflation_zero.php)

Goldhaber, G. 2008. The Acceleration of the Expansion of the Universe: A Brief Early History of the Supernova Cosmology Project (SCP). Dark Matter Conference DM08. URL: https://arxiv.org/pdf/0907.3526

Helmenstine, A. 2024, What is Antimatter? Definition and Examples. Science Notes. URL: https://sciencenotes.org/what-is-antimatter-definition-and-examples/

Hugh, C. 1911, Michell John – Encyclopedia Britannica. Cambridge University Press. 18 (11th ed): 370–371.

Jangman, G., Kamionkowsky, M., K.Griest, K. 1995, Supersymmetric Dark Matter. Elsvier. URL: PII: 0370-1573(95)00058-5 (sciencedirectassets.com)

Kapetyn J.C.1922, What constitudes the dark matter, First attempt at a theory of the arrangement and motion of the sidereal system. Am. Astro. Soc. URL: https://web.archive.org/web/20160205163816/http://indico.cern.ch/event/300768/session/0/contribution/30/attachments/566901/780884/Rosenberg-Patras_30jun14.pdf

Kelvin, W. 1904, Baltimore lectures on molecular dynamics and wave theory of light 1884, Public Domain, Lecture XVI; Cambridge University Press. URL: https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=ien.35556038198842&view=1up&seq=304

Kell, R. 2019. *In:* How does gravity affect photons (that is, bent light) if photons have no mass? URL: https://www.astronomy.com/science/how-does-gravity-affect-photons-that-is-bend-light-if-photons-have-no-mass/

Leo, M.D., 2018, Rotational curve of spiral galaxy Messier 33 (Triangulum).png. Wilipedia Commons.
URL:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotation_curve_of_spiral_galaxy_Messier_33_(Triangulum).png

Luminet, J. 2020, The Dark Matter Enigma. The Int. Rev. Sci. 5 n°3: 1-11. URL: https://browse.arxiv.org/pdf/2101.10127.pdf

NASA, 2005. Imagine the Universe**.** URL: https://imagine.gsfc.nasa.gov/educators/galaxies/imagine/hidden_mass.html

NASA, 2016. Searching for Far Out and Wandering Worlds**.** URL: https://www.jpl.nasa.gov/news/searching-for-far-out-and-wandering-worlds

NASA. 2017, Flaring Red Dwarf Star. URL: https://www.nasa.gov/image-article/flaring-red-dwarf-star/

Overbye, D. 2003, Astronomers report Evidence of 'Dark Energy' Splitting the Universe. The New York Times. URL: https://www.nytimes.com/2003/07/22/us/astronomers-report-evidence-of-dark-energy-splitting-the-universe.html

Perlmutter, S., Preuss, P., Yarris, L. 1998, Science Magazine Names Supernova Cosmology Project 'Breakthrough of the Year' Berkeley Lab, Ca URL: Science magazine names Supernova Cosmology Project "Breakthrough of the Year" for 1998 (lbl.gov)

Poincare, H. 1906, The Milky way and the theory of gases. Popular Astronomy, 14: 475-488. URL: https://articles.adsabs.harvard.edu//full/1906PA.....14..475P/0000478.000.html

Rajasekaran, G. 2016, The Story of the Neutrino. URL: https://arxiv.org/pdf/1606.08715.pdf#:~:text=Until%20some%20years%20ago%2C%20neutrinos,knowledge%20of%20physics%20and%20astronomy

Sanders, R. 2017, MACHOs are dead, WIMPs are a no-show. Say hello to SIMPs: New Candidate for Dark Matter. Phys.Org. URL: https://phys.org/news/2017-12-machos-dead-wimps-no-showsay-simps.html

Sauer, T. 2010, A brief History of Gravitational Lensing. Einstein Online. URL: https://www.einstein-online.info/en/spotlight/grav_lensing_history/

Sci.esa.int. 2024, How Gravitational lensing Acts as a Magnifying Glass. (Copyright: ESA/ESO/M. Kornmesser). URL: https://sci.esa.int/web/hubble/-/54553-how-gravitational-lensing-acts-as-a-magnifying-glass-diagram

Wikipedia. 2023, Axion. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Axion

Wikipedia. 2024a. Particle Physics. Url: https://en.wikipedia.org/wiki/Particle_physics

Wikipedia. 2024b. Red Dwarf. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Red_dwarf

Wikipedia. 2024c, Strong Gravitational Lensing, URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Strong_gravitational_lensing

Wikipedia. 2024d, Gravitational Microlensing. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_microlensing#/media/File:Gravitational_lens.gif

Wikipedia. 2024e, Dark Energy. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Dark_energy

Wikimedia Commons. 2006, Sirus A and B Hubble photo. Edited. PNG. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sirius_A_and_B_Hubble_photo.editted.PNG

Wikimedia Commons. 2007, Arcsecond and Football.png. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arcsecond_and_football.png

Wikimedia Commons. 2011a, A Horseshoe Einstein Ring from Hubble.JPG. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A_Horseshoe_Einstein_Ring_from_Hubble.JPG

Wikimedia Commons. 2011b. Gravitational micro rev.svg. URL:

Wikimedia Commons. 2020, PIA23685-Planet-BrownDwarf-Stars.jpg. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PIA23685-Planets-BrownDwarfs-Stars.jpg