
Unitats de Max Planck

Autor:

Data de publicació: 09-03-2013

En física de partícules i cosmologia física, les unitats de Planck són un sistema d'unitats de mesura definit exclusivament en termes de quatre constants físiques universals: c , G , $\hbar$ i k_B (descrites més endavant). Expressar una d'aquestes constants físiques en termes d'unitats de Planck dona un valor numèric d'1. Són un sistema d'unitats naturals, definit utilitzant propietats fonamentals de la natura (específicament, propietats de l'espai lliure) en lloc de propietats d'un objecte prototip escollit. Proposats originalment el 1899 pel físic alemany Max Planck, són rellevants en la recerca de teories unificades com la gravetat quàntica.

Un gràfic logarítmic massa–radi de diversos objectes

En física de partícules i cosmologia física, les unitats de Planck són un sistema d'unitats de mesura definit exclusivament en termes de quatre constants físiques universals: c , G , $\hbar$ i k_B (descrites més endavant). Expressar una d'aquestes constants físiques en termes d'unitats de Planck dona un valor numèric d'1. Són un sistema d'unitats naturals, definit utilitzant propietats fonamentals de la natura (específicament, propietats de l'espai lliure) en lloc de propietats d'un objecte prototip escollit. Proposats originalment el 1899 pel físic alemany Max Planck, són rellevants en la recerca de teories unificades com la gravetat quàntica.

El terme escala de Planck fa referència a quantitats d'espai, temps, energia i altres unitats que són similars en magnitud a les unitats de Planck corresponents. Aquesta regió es pot caracteritzar per energies de partícules d'uns 10^{19} GeV o 10^9 J, intervals de temps d'uns 10^{-43} s i longituds d'uns 10^{-35} m (aproximadament l'equivalent energètic de la massa de Planck, el temps de Planck i la longitud de Planck, respectivament). A l'escala de Planck, no s'espera que les prediccions del Model Estàndard, la teoria quàntica de camps i la relativitat general s'apliquen, i s'espera que els efectes quàntics de la gravetat dominin. Un exemple està representat per les condicions dels primers 10^{-43} segons del nostre univers després del Big Bang, fa aproximadament 13,8 mil milions d'anys.

Les quatre constants universals que, per definició, tenen un valor numèric 1 quan s'expressen en aquestes unitats són:

c , la velocitat de la llum en el buit,
 G , la constant gravitacional,
 $\hbar$, la constant de Planck reduïda, i
 k_B , la constant de Boltzmann.

Existeixen variants de la idea bàsica d'unitats de Planck, com ara eleccions alternatives de normalització que donen altres valors numèrics a una o més de les quatre constants anteriors.

Introducció

Qualsevol sistema de mesura pot ser assignat a un conjunt mútuament independent de quantitats base i unitats base associades, a partir del qual es poden derivar totes les altres quantitats i unitats. En el Sistema Internacional d'Unitats, per exemple, les magnituds base SI inclouen la longitud amb la unitat associada del metre. En el sistema d'unitats de Planck, es pot seleccionar un conjunt similar de quantitats base i unitats associades, en funció de les quals es poden expressar altres quantitats i unitats coherents. [1][2]: 1215 La unitat de longitud de Planck s'ha conegut com la longitud de Planck, i la unitat de temps de Planck es coneix com a temps de Planck, però aquesta nomenclatura no s'ha establert com a aplicable a totes les quantitats.

Totes les unitats de Planck es deriven de les constants físiques universals de dimensió que defineixen el sistema, i en

una convenció en què aquestes unitats s'ometen (és a dir, es tracten com si tinguessin el valor adimensional 1), aquestes constants s'eliminen de les equacions de la física en què apareixen. Per exemple, la llei de la gravetat universal de Newton,

$$F = G m_1 m_2 / r^2 = (F_P / P^2 m_P^2) m_1 m_2 / r^2,$$

es pot expressar com:

$F/F_P = (m_1/m_P)(m_2/m_P)(r/r_P)^2$. Ambdues equacions són dimensionalment consistents i igualment vàlides en qualsevol sistema de quantitats, però la segona equació, amb G absent, només relaciona quantitats adimensionals, ja que qualsevol ràtio de dues quantitats de dimensió similar és una quantitat adimensional. Si, per una convenció abreujada, s'entén que cada quantitat física és la ràtio corresponent amb una unitat de Planck coherent (o "expressada en unitats de Planck"), les ràtios anteriors es poden expressar simplement amb els símbols de la quantitat física, sense ser escalats explícitament per la seva unitat corresponent: $F = m_1 m_2 / r^2$. Aquesta última equació (sense G) és vàlida amb F , m_1 , m_2 i r sent les magnituds adimensionals corresponents a les quantitats estàndard, escrites per exemple $F \rightarrow F/P$ o $F \rightarrow F/F_P$, però no com una igualtat directa de quantitats. Això pot semblar "posar les constants c , G , etc., a 1" si la correspondència de les quantitats es considera igualtat. Per aquest motiu, Planck o altres unitats naturals s'han d'utilitzar amb cura. Referint-se a " $G = c = 1$ ", Paul S. Wesson va escriure que, "Matemàticament és un truc acceptable que estalvia mà d'obra. Físicament representa una pèrdua d'informació i pot provocar confusió.» [3]

Història i definició

Max Planck el 1933

El concepte d'unitats naturals es va introduir el 1874, quan George Johnstone Stoney, assenyalant que la càrrega elèctrica és quantitzada, va derivar unitats de longitud, temps i massa, que més tard es van anomenar unitats Stoney en el seu honor. Stoney va triar les seves unitats perquè G , c i la càrrega electrònica e fossin numèricament iguals a 1. [4] El 1899, un any abans de l'arribada de la teoria quàntica, Max Planck va introduir el que més tard es coneixeria com la constant de Planck. [5][6] Al final de l'article, va proposar les unitats de la base que més tard van ser batejades en el seu honor. Les unitats de Planck es basen en el quàntic d'acció, habitualment anomenat constant de Planck, que va aparèixer en l'aproximació de Wien per a la radiació de cos negre. Planck va subratllar la universalitat del nou sistema d'unitats, escrivint: [5]

... És possible establir unitats de longitud, massa, temps i temperatura que, independentment de cossos o substàncies especials, necessàriament conserven la seva importància per a tots els temps i per a tothom, fins i tot cultures extraterrestres i extrahumanes, i que per tant es poden anomenar "unitats naturals de mesura."

[... És possible establir unitats de longitud, massa, temps i temperatura, que són independents de cossos o substàncies especials, mantenint necessàriament el seu significat per a tots els temps i per a totes les civilitzacions, incloses les extraterrestres i les no humanes, que es poden anomenar "unitats naturals de mesura".]

Planck només considerava les unitats basades en les constants universals G , h , c , i k_B per arribar a unitats naturals de longitud, temps, massa i temperatura. [6] Les seves definicions difereixen de les modernes per un factor de 2π , perquè les definicions modernes utilitzen $\hbar$ en comptes de h . [5][6]

Taula 1: Valors moderns per a l'elecció original de quantitats de Planck

Nom	Dimensió	Expressió	Valor (unitats SI)
-----	----------	-----------	--------------------

Longitud de Planck			
longitud (L)			
$l_P = \sqrt{\hbar G / c^3}$			

$1,616255(18) \times 10^{-35} \text{ m}^3$

Massa de Planck

Massa (M)

$m_P = \sqrt{\hbar c / G}$

$2.176434(24) \times 10^{-8} \text{ kg}$

Temps de Planck

temps (T)

$t_P = \sqrt{\hbar / G c^3}$

$5.391247(60) \times 10^{-44} \text{ s}$

Temperatura de Planck

temperatura (?)

$T_P = \sqrt{\hbar c^5 / G k_B}$

$1.416784(16) \times 10^{32} \text{ K}$

A diferència del cas del Sistema Internacional d'Unitats, no hi ha cap entitat oficial que estableixi una definició d'un sistema d'unitats de Planck. Alguns autors defineixen les unitats base de Planck com les de massa, longitud i temps, respecte a una unitat addicional perquè la temperatura sigui redundant. [a] Altres tabulacions afegeixen, a més d'una unitat per a la temperatura, una unitat per a la càrrega elèctrica, de manera que o bé la constant de Coulomb k_e [12][13][14] o la permitivitat del buit ϵ_0 [15] es normalitza a 1. Així, depenent de l'elecció de l'autor, aquesta unitat de càrrega es dona per $q_P = 4\pi\epsilon_0\hbar c \sqrt{1.875546 \times 10^{-18} \text{ C}^2/11.7}$ eper a $k_e=1$, o $q_P = \epsilon_0\hbar c \sqrt{5.290818 \times 10^{-19} \text{ C}^2/3.3}$ eper a $\epsilon_0=1$. Algunes d'aquestes tabulacions també substitueixen la massa per energia en fer-ho. [15] La primera coincideix amb la taula anterior en el sentit que dues partícules d'aquesta càrrega i una massa de Planck experimenten forces electrostàtiques i gravitatòries equilibrades, mentre que la segona coincideix amb les unitats de Planck racionalitzades. En unitats SI, els valors de c , $\hbar$, e i k_B són exactes i els valors de ϵ_0 i G en unitats SI respectivament tenen incerteses relatives de $1,6 \times 10^{-10}$ [16] i $2,2 \times 10^{-5}$. [17] Per tant, les incerteses en els valors SI de les unitats de Planck deriven gairebé exclusivament de la incertesa en el valor SI de G .

Comparat amb les unitats de Stoney, les unitats base de Planck són totes més grans per un factor $1/a \approx 11.7$, on a és la constant d'estructura fina. [18]

Unitats derivades

En qualsevol sistema de mesura, es poden derivar unitats per a moltes magnituds físiques a partir d'unitats base. La Taula 2 ofereix una mostra d'unitats de Planck derivades, algunes de les quals s'utilitzen molt poc. Com passa amb les unitats bàsiques, el seu ús es limita principalment a la física teòrica perquè la majoria són massa grans o massa petites per a un ús empíric o pràctic i hi ha grans incerteses en els seus valors.

Taula 2: Unitats derivades coherents d'unitats de Planck

Unitat derivada de Expressió Equivalent aproximat de SI

Àrea (L²)

$l_P^2 = \hbar c / G$

$2,6121 \times 10^{-70} \text{ m}^2$

volum (L³)

$l_P = (\hbar G/c^3)^{1/2} = 4,2217 \times 10^{-35} \text{ m}$

moment (LMT²)
 $m_P c = \hbar G/c^3 = 6,5249 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$

energia (L² MT⁻²)
 $E_P = m_P c^2 = \hbar G/c^5 = 1.9561 \times 10^9 \text{ J}$

força (LMT⁻²)
 $F_P = E_P l_P = \hbar G/c^4 = 1.2103 \times 10^{44} \text{ N}$

densitat (L⁻³ M)
 $\rho_P = m_P l_P^3 = \hbar G/c^5 = 5,1550 \times 10^{96} \text{ kg/m}^3$

acceleració (LT⁻²)
 $a_P = c t_P = \hbar G/c^7 = 5,5608 \times 10^{51} \text{ m/s}^2$

Algunes unitats de Planck, com el temps i la durada, són molts ordres de magnitud massa grans o massa petites per ser d'utilitat pràctica, de manera que les unitats de Planck com a sistema són típicament només rellevants per a la física teòrica. En alguns casos, una unitat de Planck pot suggerir un límit a un rang d'una magnitud física on s'apliquen les teories actuals de la física. [19] Per exemple, la nostra comprensió del Big Bang no s'estén a l'època de Planck, és a dir, quan l'univers tenia menys d'un temps de Planck. Descriure l'univers durant l'època de Planck requereix una teoria de la gravetat quàntica que expliqui tant els efectes quàntics com la relativitat general en els seus respectius dominis d'aplicabilitat. Aquesta teoria encara no existeix.

Diverses quantitats no són "extremes" en magnitud, com la massa de Planck, que és d'uns 22 micrograms: molt gran en comparació amb partícules subatòmiques, i dins del rang de massa dels organismes vius. [20]: 872 De manera similar, les unitats relacionades d'energia i de moment estan en l'interval d'alguns fenòmens quotidians.

Significat

Les unitats de Planck tenen poca arbitrarietat antropocèntrica, però encara impliquen algunes eleccions arbitràries en termes de les constants definidores. A diferència del metre i el segon, que existeixen com a unitats base en el sistema SI per raons històriques, la longitud de Planck i el temps de Planck estan conceptualment vinculats a un nivell físic fonamental. En conseqüència, les unitats naturals ajuden els físics a replantejar les qüestions. Frank Wilczek ho expressa de manera concisa:

Veiem que la pregunta [plantejada] no és, «Per què la gravetat és tan feble?» sinó més aviat, «Per què la massa del protó és tan petita?» Perquè en unitats naturals (de Planck), la força de la gravetat és simplement la que és, una quantitat primària, mentre que la massa del protó és el diminut nombre 1/13 quintilió. [21]

Tot i que és cert que la força repulsiva electrostàtica entre dos protons (sols en l'espai lliure) supera àmpliament la força atractiva gravitatòria entre els mateixos dos protons, això no té a veure amb la força relativa de les dues forces

fonamentals.

Quan Planck va proposar les seves unitats, l'objectiu era només establir una manera universal ("natural") de mesurar objectes, sense donar cap significat especial a quantitats que mesuressin una sola unitat. Durant la dècada de 1950, diversos autors, incloent-hi Lev Landau i Oskar Klein, van argumentar que quantitats de l'ordre de l'escala de Planck indicaven els límits de la validesa de la teoria quàntica de camps. John Archibald Wheeler va proposar el 1955 que les fluctuacions quàntiques de l'espai-temps esdevenen significatives a l'escala de Planck, tot i que en aquell moment no coneixia les unitats de Planck. [22][23]

Escala de Planck

En física de partícules i cosmologia física, l'escala de Planck és una escala d'energia al voltant de $1,22 \times 10^{28}$ eV (l'energia de Planck, corresponent a l'equivalent energètic de la massa de Planck, $2,17645 \times 10^{-8}$ kg) a la qual els efectes quàntics de la gravetat esdevenen importants. A aquesta escala, les descripcions i teories actuals de les interaccions subatòmiques de partícules en termes de teoria quàntica de camps es descomponen i esdevenen insuficients, a causa de l'impacte de la aparent no renormalitzabilitat de la gravetat dins de les teories actuals. [19]

Relació amb la gravetat

A l'escala de longitud de Planck, s'espera que la força de la gravetat esdevingui comparable a la de les altres forces, i s'ha teoritzat que totes les forces fonamentals s'uneixen a aquesta escala, però el mecanisme exacte d'aquesta unificació continua sent desconegut. [24] L'escala de Planck és, per tant, el punt en què els efectes de la gravetat quàntica ja no es poden ignorar en altres interaccions fonamentals, on els càlculs i enfocaments actuals comencen a fallar, i cal un mitjà per tenir en compte el seu impacte. [25] Per aquests motius, s'ha especulat que podria ser un límit inferior aproximat en què es podria formar un forat negre per col·lapse. [26]

Tot i que els físics tenen un coneixement força bo de les altres interaccions fonamentals de forces a nivell quàntic, la gravetat és problemàtica i no es pot integrar amb la mecànica quàntica a energies molt altes utilitzant el marc habitual de la teoria quàntica de camps. En nivells d'energia menors normalment s'ignora, mentre que per a energies que s'aproximen o superen l'escala de Planck, cal una nova teoria de la gravetat quàntica. Els enfocaments a aquest problema inclouen la teoria de cordes i la teoria M, la gravetat quàntica de bucles, la geometria no commutativa i la teoria de conjunts causals. [27]

En cosmologia

Article principal: Cronologia de l'univers

Més informació: Variació temporal de constants fonamentals

En la cosmologia del Big Bang, l'època de Planck o era de Planck és l'etapa més primerenca del Big Bang, abans que el temps transcorregut fos igual al temps de Planck, t_P , o aproximadament 10^{-43} segons. [28] Actualment no hi ha cap teoria física disponible per descriure temps tan curts, i no està clar en quin sentit el concepte de temps és significatiu per a valors menors que el temps de Planck. Generalment s'assumeix que els efectes quàntics de la gravetat dominen les interaccions físiques en aquesta escala temporal. A aquesta escala, s'assumeix que la força unificada del Model Estàndard està unificada amb la gravetat. Incommensurablement calent i dens, l'estat de l'època Planck va ser succeït per l'època de la gran unificació, on la gravetat es separa de la força unificada del Model Estàndard, seguida al seu torn per l'època inflacionària, que acabava després d'uns 10^{-32} segons (o uns $10^{11} t_P$). [29]

La Taula 3 enumera les propietats de l'univers observable avui expressades en unitats de Planck. [30][31]

Taula 3: L'univers actual en unitats de Planck

Propietat de l'univers
observable actualNombre
aproximat d'unitats de PlanckEquivalents

Edat
 $8,08 \times 10^{10}$ tP
 $4,35 \times 10^{17}$ s o $1,38 \times 10^{10}$ anys

Diàmetre
 $5,4 \times 10^{61}$ IP
 $8,7 \times 10^{26}$ m o $9,2 \times 10^{10}$ anys llum

Missa
aprox. 10^{60} mP
 3×10^{52} kg o $1,5 \times 10^{22}$ masses solars (només comptant les estrelles)
1080 protons (de vegades conegut com el nombre d'Eddington)

Densitat
 $1,8 \times 10^{-123}$ mP?IP?3
 $9,9 \times 10^{-27}$ kg?m?3

Temperatura
 $1,9 \times 10^{-32}$ TP
Temperatura de 2,725 K
de la radiació còsmica de fons de microones

Constant cosmològica
 $? 10^{-122}$ l ?2
P
 $? 10^{-52}$ m?2

Constant de Hubble
 $? 10^{-61}$ t ?1
P
 $? 10^{-18}$ s?1 ? 10^2 (km/s)/Mpc

Després de la mesura de la constant cosmològica (?) el 1998, estimada en 10^{-122} en unitats de Planck, es va observar que això és suggeridament proper al recíproc de l'edat de l'univers (T) al quadrat. Barrow i Shaw van proposar una teoria modificada en què ? és un camp que evoluciona de manera que el seu valor roman ? ~ T?2 al llarg de la història de l'univers. [32]

Anàlisi de les unitats

Longitud de Planck

La longitud de Planck és aproximadament 10^{-20} vegades el diàmetre d'un protó. [33] Es pot motivar de diverses maneres, com ara considerar una partícula la longitud d'ona Compton reduïda de la qual és comparable al seu radi de

Schwarzschild,[33][34][35] tot i que si aquests conceptes són realment aplicables simultàniament és obert a debat. [36] (El mateix argument heurístic motiva simultàniament la massa de Planck.[34])

La longitud de Planck és una escala de distància d'interès en especulacions sobre la gravetat quàntica. L'entropia de Bekenstein–Hawking d'un forat negre és una quarta part de l'àrea del seu horitzó d'esdeveniments en unitats de longitud de Planck al quadrat. [11]: 370 Des dels anys 50, s'ha conjeatut que les fluctuacions quàntiques de la mètrica de l'espai-temps podrien fer que la noció familiar de distància no sigui aplicable per sota de la longitud de Planck. [23][37][22][38] Això de vegades s'expressa dient que "l'espai-temps esdevé una escuma a escala de Planck". [39] És possible que la longitud de Planck sigui la distància físicament mesurable més curta, ja que qualsevol intent d'investigar l'existència possible de distàncies més curtes, realitzant col·lisions d'energia més alta, resultaria en la producció de forats negres. Les col·lisions d'energia més alta, en lloc de dividir la matèria en peces més fines, simplement produirien forats negres més grans. [40]

Les cordes de la teoria de cordes es modelen de l'ordre de la longitud de Planck. [41][42] En teories amb grans dimensions addicionals, la longitud de Planck es calcula a partir del valor observat de G pot ser menor que la veritable longitud de Planck fonamental. [11]: 61 [43]

Temps de Planck

Cap teoria física actual descriu adequadament el període més primerenc del model del Big Bang de l'ordre del temps de Planck. [28]

Energia de Planck

L'energia de Planck E_P és aproximadament igual a l'energia alliberada en la combustió del combustible en un dipòsit d'automòbil (57,2 L a 34,2 MJ/L d'energia química). El raig còsmic d'ultra-alta energia observat el 1991 tenia una energia mesurada d'uns 50 J, equivalent a uns $2,5 \times 10^{28} E_P$. [44][45]

Les propostes per a teories de la doble relativitat especial proposen que, a més de la velocitat de la llum, una escala d'energia també és invariant per a tots els observadors inercials. Normalment, aquesta escala d'energia es tria com l'energia de Planck. [46][47]

Unitat de força Planck

La unitat de força de Planck és la força atractiva gravitatòria de dos cossos d'1 massa de Planck cadascun, que estan separats per una longitud de Planck. Una convenció per a la càrrega de Planck és triar-la de manera que la repulsió electrostàtica de dos objectes amb càrrega i massa de Planck que estan separats per una longitud de Planck equilibri l'atracció newtoniana entre ells. [48]

Alguns autors han argumentat que la força de Planck és de l'ordre de la força màxima que pot ocórrer entre dos cossos. [49][50] Tanmateix, la validesa d'aquestes conjeatures ha estat qüestionada. [51][52]

Temperatura de Planck

A la temperatura de Planck, la longitud d'ona de la llum emesa per la radiació tèrmica arriba a la longitud de Planck. No es coneixen models físics capaços de descriure temperatures superiors a T_P ; Caldria una teoria quàntica de la gravetat per modelar les energies extremes absolutes. [53] Hipotèticament, un sistema en equilibri tèrmic a la temperatura de Planck podria contenir forats negres a escala de Planck, que es formen constantment a partir de la radiació tèrmica i es desintegren per evaporació de Hawking. Afegir energia a un sistema així podria disminuir la seva temperatura creant forats negres més grans, la temperatura de Hawking dels quals és més baixa. [54]

Les magnituds físiques que tenen diferents dimensions (com el temps i la longitud) no es poden igualar encara que siguin numèricament iguals (per exemple, 1 segon no és el mateix que 1 metre). En física teòrica, però, aquest escrúpol pot quedar de banda per un procés anomenat no dimensionalització. El resultat efectiu és que moltes equacions fonamentals de la física, que sovint inclouen algunes de les constants utilitzades per definir unitats de Planck, esdevenen equacions on aquestes constants es substitueixen per un 1.

Exemples inclouen la relació energia–moment $E^2=(mc^2)^2+(pc)^2$ (que esdevé $E^2=m^2+p^2$) i l'equació de Dirac $(i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu - mc)\psi=0$ (que esdevé $(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi=0$).

Opcions alternatives de normalització

Com ja s'ha dit anteriorment, les unitats de Planck es deriven "normalitzant" els valors numèrics de certes constants fonamentals a 1. Aquestes normalitzacions no són ni les úniques possibles ni necessàriament les millors. A més, l'elecció dels factors a normalitzar, entre els factors que apareixen en les equacions fonamentals de la física, no és evident, i els valors de les unitats de Planck són sensibles a aquesta elecció.

El factor 4π és omnipresent en la física teòrica perquè en l'espai tridimensional, l'àrea superficial d'una esfera de radi r és $4\pi r^2$. Això, juntament amb el concepte de flux, és la base per a la llei de l'invers del quadrat, la llei de Gauss i l'operador de divergència aplicat a la densitat de flux. Per exemple, els camps gravitatoris i electrostàtics produïts per objectes puntuals tenen simetria esfèrica, i per tant el flux elèctric a través d'una esfera de radi r al voltant d'una càrrega puntual es distribuirà uniformement sobre aquesta esfera. D'això se'n dedueix que un factor de $4\pi r^2$ apareixerà en el denominador de la llei de Coulomb en forma racionalitzada. [30]: 214–15 (Tant el factor numèric com la potència de la dependència de r canviarien si l'espai fos de dimensió superior; les expressions correctes es poden deduir de la geometria d'esferes de dimensions superiors.[11]: 51) De manera similar per a la llei de la gravetat universal de Newton: un factor de 4π apareix naturalment en l'equació de Poisson quan es relaciona el potencial gravitatori amb la distribució de la matèria. [11]: 56

Per tant, un cos substancial de teoria física desenvolupat des de l'article de Planck de 1899 suggereix normalitzar no G sinó $4\pi G$ (o $8\pi G$) a 1. Fer-ho introduiria un factor de $1/4\pi$ (o $1/8\pi$) a la forma no dimensionalitzada de la llei de la gravetat universal, coherent amb la formulació racionalitzada moderna de la llei de Coulomb en termes de la permitivitat del buit. De fet, les normalitzacions alternatives sovint preserven el factor de $1/4\pi$ també en la forma no dimensionalitzada de la llei de Coulomb, de manera que les equacions de Maxwell no dimensionalitzades per a l'electromagnetisme i el gravitoelectromagnetisme prenen la mateixa forma que les de l'electromagnetisme en SI, que no tenen cap factor de 4π . Quan això s'aplica a constants electromagnètiques, ϵ_0 , aquest sistema unitari s'anomena "racionalitzat". Quan s'apliquen addicionalment a les unitats gravitacionals i de Planck, aquestes s'anomenen unitats de Planck racionalitzades[55] i es veuen en la física d'altres energies. [56]

Aquestes unitats de Planck racionalitzades es defineixen de manera que $c = 4\pi G = \hbar = k_B = 1$. Això produeix el següent conjunt d'unitats:

Expressió Valor (unitats SI)

$l_P = \sqrt{\hbar G / c^3}$
 $5,7295 \times 10^{-35} \text{ m}$

$m_P = \sqrt{\hbar c / G}$
 $6,1396 \times 10^{-9} \text{ kg}$

$t_P = \sqrt{\hbar G / c^5}$

$1,9111 \times 10^{43} \text{ s}$

$qP = E_0 c$

$5.2908 \times 10^{19} \text{ C}$

$TP = c 54 p G k B 2$

$3,9967 \times 10^{31} \text{ K}$

Constant gravitacional

G gairebé sempre apareix en fórmules multiplicades per 4? o un petit múltiple enter d'aquestes. Per tant, una elecció a prendre en dissenyar un sistema d'unitats naturals és quines, si n'hi ha, les instàncies de 4? que apareixen en les equacions de la física s'han d'eliminar mitjançant la normalització.

Normalitzant 4?G a 1:

La llei de Gauss per a la gravetat esdevé $\nabla \cdot g = -4\pi G \rho$ (en lloc de $\nabla \cdot g = -4\pi G \rho$ en unitats de Planck).

Elimina 4?G de l'equació de Poisson.

Elimina 4?G en les equacions gravitoelectromagnètiques (GEM), que es mantenen en camps gravitatoris febles o en espais temps localment pla. Aquestes equacions tenen la mateixa forma que les equacions de Maxwell (i l'equació de la força de Lorentz) de l'electromagnetisme, amb la densitat de massa substituint la densitat de càrrega, i amb $1/4\pi G$ substituint $1/4\pi \epsilon_0$.

Normalitza la impedància característica Z_g de la radiació gravitatòria en espai lliure a 1 (normalment expressada com $4\pi G/c^3$). [b]

Elimina 4?G de la fórmula de Bekenstein–Hawking (per a l'entropia d'un forat negre en termes de la seva massa m_{BH} i l'àrea del seu horitzó d'esdeveniments A_{BH}), que es simplifica a $S_{BH} = A_{BH}/(4 m_{BH}^2)$.

Configuració 8?G = 1. Això eliminaria 8?G de les equacions de camp d'Einstein, l'acció d'Einstein–Hilbert i les equacions de Friedmann, per a la gravetat. Les unitats de Planck modificades perquè 8?G = 1 es coneixen com a unitats de Planck reduïdes. A més, la fórmula de Bekenstein–Hawking per a l'entropia d'un forat negre es simplifica a $S_{BH} = A_{BH}/(4 m_{BH}^2) = 2\pi A_{BH}$.

Vegeu també

Física cGh

Anàlisi dimensional

Doble relativitat especial

Problema transplanckia

Energia de punt zero

Notes explicatives

Per exemple, tant Frank Wilczek com Barton Zwiebach ho fan,[1][11]: 54, igual que el llibre de text Gravitation. [2]: 1215

La relativitat general prediu que la radiació gravitatòria i la radiació electromagnètica es propaguen a la mateixa

